



TUGAS AKHIR - TE141599

IDENTIFIKASI *WEAK BUS* DAN PENINGKATAN *VOLTAGE STABILITY* PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATRA UTARA 150/275 kV BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2024

Wisnu Fajri
NRP 2215105005

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Danar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

IDENTIFIKASI *WEAK BUS* DAN PENINGKATAN *VOLTAGE STABILITY* PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATRA UTARA 150/275 kV BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2024

Wisnu Fajri
NRP 2215105005

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Danar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**IDENTIFICATION OF WEAK BUS AND VOLTAGE
STABILITY ENHANCEMENT IN NORTH SUMATRA
150/275 kV ELECTRICAL SYSTEM BASED ON RUPTL
YEAR 2024**

Wisnu Fajri
NRP 2215105005

Counsellor Lecturer
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Danar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Identifikasi *Weak Bus* dan Peningkatan *Voltage Stability* Pada Sistem Kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV Berdasarkan RUPTL Tahun 2024”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 24 Juli 2017

Wisnu Fajri
NRP : 2215105005

**IDENTIFIKASI *WEAK BUS* DAN PENINGKATAN *VOLTAGE STABILITY* PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATRA UTARA
150/275 KV BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2024**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 194907151974121001

Danar Fahmi, S.T., M.T.
NIP. 198909252014041002



IDENTIFIKASI *WEAK BUS* DAN PENINGKATAN VOLTAGE STABILITY PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATRA UTARA 150/275 kV BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2024

Nama : Wisnu Fajri
Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRAK

Berdasarkan RUPTL, sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV tahun 2024 direncanakan akan banyak mengalami perubahan, baik pada sisi pembangkitan, transmisi maupun beban. Penambahan daya beban pada suatu bus dapat menyebabkan terjadinya penurunan profil tegangan apabila tidak diikuti dengan penambahan suplai pada sisi pembangkitan, bahkan resiko yang lebih besar dapat mengakibatkan terjadinya pemadaman. Hal ini merupakan salah satu fenomena ketidakstabilan tegangan sistem tenaga akibat adanya perubahan peningkatan permintaan beban. Diantara beberapa cara yang dapat mengatasi persoalan ini adalah dengan cara memberikan injeksi kompensasi daya reaktif kapasitif pada bus lemah (*weak bus*) untuk mengurangi daya reaktif induktif dan menurunkan jatuh tegangan. Bus terlemah yang diperoleh dari sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV tahun 2024 adalah bus Sei Kera dengan nilai VP *sensitivities* -0.000018. Pemasangan kapasitor *shunt* sebesar 189,9 MVar pada bus Sei Kera memberikan pengaruh terhadap peningkatan profil tegangan, batas stabilitas tegangan dan peningkatan daya yang mampu ditransfer. Pada bus Sei Kera terjadi peningkatan daya yang mampu ditransfer dari 197,29 MW menjadi 619,69 MW. Peningkatan stabilitas tegangan secara jelas juga dapat dilihat dari kurva PV sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor *shunt*.

Kata Kunci : Kurva PV, Sensitivitas, Stabilitas tegangan, Sistem Kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV 2024, *Weak Bus*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**IDENTIFICATION OF WEAK BUS AND VOLTAGE
STABILITY ENHANCEMENT IN NORTH SUMATRA
150/275 kV ELECTRICAL SYSTEM BASED ON RUPTL
YEAR 2024**

Name : Wisnu Fajri
Advisor I : Prof. Ir Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D.
Advisor II : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRACT

Based on RUPTL, North Sumatra 150/275 kV electricity system in 2024 is planned to changes on generation, transmission and load sides. The increase of load power of both active and reactive power on a bus may cause a decrease in the voltage profile if not followed by the increase of supply at the generation side, even greater risk may result in blackout. This is one of the phenomenon of power system voltage instability due to changes in load demand increases. Among the several ways that can solve this problem is by providing injection of capacitive reactive power in the weak bus to reduce the inductive reactive power on the line and decrease voltage drop. Weakest bus obtained from North Sumatra 150/275 kV electrical system in 2024 is Sei Kera bus with VP sensitivities -0.000018. The installation of shunt capacitor 189.9 MVar on bus Sei Kera affects the increase in voltage profile, voltage stability limits and increase in transferable power. On Sei Kera bus there is increase in power that can be transferred from 197.29 MW to 619.69 MW. Improved of voltage stability also can be seen from the PV curve before and after the installation of shunt capacitor.

Keywords : North Sumatra 150/275 kV Electrical System Year 2024, PV Curve, Sensitivity, Voltage Stability, Weak Bus.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Bismillah, Alhamdulillah robbil 'alamin 'ala kulli hal. Puji syukur kehadiran Allah *subhanahu wata'ala*, sholawat kehadiran Nabi Muhammad *shallallahu 'alaihi wasallam*, berkat limpahan rahmat, hidayah serta karunia-Nya yang selama ini telah dikaruniakan kepada penulis, akhirnya penulis mampu melaksanakan kewajibannya sebagai mahasiswa Departemen Teknik Elektro FTE ITS bidang studi Teknik Sistem Tenaga yaitu, menyelesaikan tugas akhir dengan judul:

IDENTIFIKASI *WEAK BUS* DAN PENINGKATAN *VOLTAGE STABILITY* PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATRA UTARA 150/275 kV BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2024

Selanjutnya penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya sebagai bentuk penghargaan kepada semua pihak yang telah membantu dan memotivasi penulis selama proses pengerjaan tugas akhir, ucapan terimakasih diperuntukan kepada :

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Suparman dan Ibu Siti Mariah serta kakak dan adik tersayang Fitriyanti dan Fahmi Salam yang selalu memberikan dukungan baik moril maupun materil, memotivasi, menyemangati dan mendo'akan penulis, sehingga proses pengerjaan tugas akhir dapat terlaksana dengan lancar.
2. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. dan Bapak Daniar Fahmi, S.T., M.T. sebagai Dosen Pembimbing yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengarahan dan bimbingan dalam proses menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro ITS, serta Bapak Dedet Candra Riawan, S.T., M. Eng., Ph.D. selaku Ketua Program Sarjana Departemen Teknik Elektro ITS.
4. Seluruh Dosen Departemen Teknik Elektro ITS yang telah mendidik dan mengajarkan ilmu pengetahuan kepada penulis selama duduk dibangku kuliah.
5. Teman-teman Departemen Teknik Elektro ITS, khususnya teman dan rekan seperjuangan mahasiswa Lintas Jalur angkatan 2015 bidang studi Teknik Sistem Tenaga.
6. Seluruh asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik.
7. Teman dan rekan kos Keputih Makam Blok D15, serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Semoga kebaikan yang telah diberikan oleh Bapak/Ibu, Saudara/i mendapat balasan dari Allah *subhanahu wata'ala. Jazakumullohu Khoir.*

Penulis berharap, semoga karya tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membutuhkan khususnya bagi kalangan mahasiswa yang mengambil jurusan Teknik Elektro bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selanjutnya penulis pun menyadari, bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga koreksi dan masukan dari pembaca sangat diperlukan bagi kemajuan penulis.

Surabaya, 24 Juli 2017

Wisnu Fajri
2215 105 005

DAFTAR ISI

Halaman

JUDUL

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan dan Manfaat	2
1.5. Metodologi	3
1.6. Sistematika Penulisan	3

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1. Sistem Tenaga Listrik	5
2.2. Sistem Pembangkit Tenaga Listrik	6
2.3. Sistem Transmisi	6
2.3.1 Model Saluran Transmisi Menengah	8
2.3.2 Model Saluran Transmisi Panjang	11
2.4. Daya Listrik Pada Sistem AC	11
2.4.1 Daya Aktif ($P=Watt$)	13
2.4.2 Daya Reaktif ($Q=Var$)	14
2.4.3 Daya Kompleks ($S=VA$)	14
2.4.4 Rangkaian Listrik Tiga Fase	15
2.4.5 Koreksi Faktor Daya ($\cos \phi$)	16
2.5. Analisa Aliran Daya	17
2.5.1. Aliran Daya Kompleks	18
2.5.2. Persamaan Aliran Daya	19
2.5.3. Aliran Daya Metode Newton Rhapson	20
2.5.4. Rugi-Rugi Transmisi	24

2.6. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	25
2.6.1 Stabilitas Sudut Rotor	25
2.6.2 Stabilitas Frekuensi.....	27
2.6.3 Stabilitas Tegangan.....	27
2.7. Kurva P-V.....	28
2.8. Kapasitor <i>Shunt</i>	29
2.9. <i>PowerWorld Simulator 19</i>	30
2.10. Sensitivitas Tegangan	31

BAB 3 PEMODELAN SISTEM

3.1. Data Sistem Kelistikan Sumut 150/275 kV	33
3.2. Identitas Bus pada Sistem Kelistrikan Sumut 150/275 kV	40
3.3. Metodologi Simulasi	41

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. Sistem Kelistrikan Sumut 150/275 kV	45
4.2. Simulasi Aliran Daya	46
4.3. Analisa Penentuan <i>Weak Bus</i>	54
4.4. Plot Kurva PV.....	60
4.5. Analisa Peningkatan Stabilitas Tegangan	62

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	68

DAFTAR PUSTAKA	69
-----------------------------	----

RIWAYAT HIDUP	71
----------------------------	----

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Ilustrasi interkoneksi sistem tenaga listrik.....	5
Gambar 2.2. Model saluran transmisi tenaga listrik	7
Gambar 2.3. Model saluran transmisi menengah nominal π	8
Gambar 2.4. Model saluran transmisi dengan konstanta ABCD	9
Gambar 2.5. Model saluran transmisi menengah nominal T	10
Gambar 2.6. Model saluran transmisi panjang	11
Gambar 2.7. Rangkaian listrik dengan suplai sinusoidal	12
Gambar 2.8. Aliran daya aktif	13
Gambar 2.9. Aliran daya reaktif induktif.....	14
Gambar 2.10. Aliran daya reaktif kapasitif	14
Gambar 2.11. Segitiga daya (a) beban induktif (b) beban kapasitif	15
Gambar 2.12. Urutan fase (a) positif/abc (b) negatif/acb	16
Gambar 2.13. Koreksi faktor daya.....	17
Gambar 2.14. Ilustrasi aliran daya sistem 2 bus	18
Gambar 2.15. Representasi aliran daya pada bus	19
Gambar 2.16. Solusi metode Newton Rhapson	21
Gambar 2.17. Aliran daya saluran transmisi.....	24
Gambar 2.18. Klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik	25
Gambar 2.19. Kurva PV	29
Gambar 2.20. Konfigurasi kapasitor <i>shunt</i> pada bus	29
 Gambar 3.1. Sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV 2024	 33
Gambar 3.2. <i>Flowchart</i> metodologi penelitian	42
 Gambar 4.1. Grafik profil tegangan bus sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV	 54
Gambar 4.2. <i>Sensitivites menu</i>	55
Gambar 4.3. Kotak dialog <i>Flow and Voltage Sensitivities</i>	56
Gambar 4.4. Hasil <i>Calculate Sensitivities</i>	56
Gambar 4.5. Kurva PV 2 bus terlemah.....	61
Gambar 4.6. Grafik profil tegangan bus sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor <i>shunt</i>	65
Gambar 4.7. Kurva PV 2 bus terlemah sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor <i>shunt</i>	66

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1. Data saluran sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV	34
Tabel 3.2. Data beban dan pembangkitan sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV Jamali.....	38
Tabel 4.1. Hasil simulasi aliran daya Sumut 150/275 kV 2024	46
Tabel 4.2. Rugi-rugi daya pada transmisi Sumut 150/275 kV.....	48
Tabel 4.3. 5 bus terlemah pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV 2024.....	57
Tabel 4.4. Drop tegangan bus setelah penambahan beban	57
Tabel 4.5. Bus <i>undervoltage</i> setelah penambahan beban	60
Tabel 4.6. Injek MVar pada bus Sei Kera untuk meningkatkan profil tegangan.....	63

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Seiring dengan kemajuan teknologi yang modern, listrik telah menjadi kebutuhan primer bagi manusia. Dari masa ke masa, kebutuhan listrik selalu mengalami peningkatan sehingga sistem tenaga listrik yang ada dituntut agar dapat menyesuaikan dengan permintaan kebutuhan listrik tersebut. Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) yang dikeluarkan oleh pemerintah sebagai pedoman pembangunan kelistrikan 10 tahun mendatang, dapat diketahui bahwa sistem kelistrikan di Sumatra Utara sampai pada tahun 2024 banyak mengalami perubahan konfigurasi baik disisi pembangkitan, transmisi maupun distribusi [1]. Dengan perubahan konfigurasi tersebut maka sangat dimungkinkan muncul masalah-masalah kelistrikan seperti kualitas tegangan menurun dan *losses* pada saluran semakin meningkat yang keduanya dapat mengakibatkan terjadinya ketidakstabilan sistem.

Ketidakstabilan sistem ini tentunya sangat tidak diharapkan adanya dalam seluruh sistem tenaga listrik, khususnya pada sistem transmisi yang akan menjadi pembahasan dalam tugas akhir ini. Pada umumnya, pusat-pusat beban berada pada jarak yang relatif jauh dari pusat pembangkitan tenaga listrik sehingga mengakibatkan terjadinya penurunan level tegangan pada sisi terima. Pemasangan *shunt capacitor* merupakan cara yang paling sederhana juga paling banyak digunakan dan dinilai paling efektif, baik untuk meningkatkan profil tegangan, batas stabilitas tegangan maupun peningkatan kemampuan transfer daya [2]. Dengan pemberian kompensasi daya reaktif pada bus-bus yang telah teridentifikasi lemah, arus pada saluran akan menurun sehingga *losses* pun akan berkurang dan tegangan pada setiap bus akan terjaga pada keadaan stabil. Penggunaan kompensasi daya reaktif dengan menggunakan *shunt capacitor* juga dinilai lebih ekonomis jika dibandingkan dengan menggunakan kompensasi daya reaktif lainnya.

Dengan demikian, untuk mengatasi permasalahan-permasalahan tersebut, maka perlu adanya analisa kestabilan tegangan pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV untuk mengetahui bus-bus lemah dan meningkatkannya dengan memberikan kompensasi daya reaktif menggunakan *shunt capacitor*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana menentukan *weak bus* pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV tahun 2024 ?
2. Bagaimana pengaruh pemasangan *shunt capacitor* terhadap peningkatan stabilitas tegangan kurva PV pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV tahun 2024 ?

1.3 Batasan Masalah

Dalam pembahasan tugas akhir ini ditentukan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software PowerWorld Simulator 19*.
2. Analisa dilakukan dengan menggunakan data sistem kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV tahun 2024.
3. Analisa identifikasi *weak bus* dengan menggunakan index sensitivitas VP dan mengevaluasi kurva PV pada *weak bus* yang diperoleh dari sistem kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV tahun 2024.
4. Peningkatan stabilitas tegangan dengan memberi kompensasi daya reaktif menggunakan *shunt capacitor* yang dipasang pada bus terlemah yang telah teridentifikasi.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah mendapatkan sistem kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV yang stabil dari sisi tegangan pada semua bus seiring dengan perencanaan pengembangan kelistrikan sampai tahun 2024 dengan melakukan pemasangan *shunt* kompensasi daya reaktif pada bus-bus yang teridentifikasi lemah.

Hasil analisa yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi perusahaan listrik khususnya, dalam mempertimbangkan perencanaannya dalam membangun kelistrikan beberapa tahun kedepan di wilayah Sumatra Utara sehingga permasalahan-permasalahan kelistrikan yang dimungkinkan terjadi dapat teratasi.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data

Data-data yang digunakan adalah berupa data pembangkitan, data saluran dan data peramalan beban pada sistem kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV tahun 2024. Data tersebut diperoleh dari RUPTL, PT. PLN dan data tugas akhir yang pernah dilakukan sebelumnya oleh mahasiswa Teknik Elektro ITS Danar Tri Kumar yang membahas tentang stabilitas transient Sumatra Utara tahun 2020.

2. Pemodelan Sistem dan Simulasi

Setelah proses pengumpulan data, selanjutnya melakukan pemodelan sistem dan simulasi atas sistem kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV dengan menggunakan *software PowerWorld Simulator 19*. Simulasi yang dilakukan adalah berupa *power flow* dengan metode *Newton Raphson*, *sensitivities analysis* dan menampilkan kurva PV.

3. Analisa Data

Setelah melakukan simulasi, tahap selanjutnya adalah menganalisa hasil yang diperoleh dari simulasi tersebut. Dari hasil simulasi, bus terlemah pada sistem kelistrikan Sumatra Utara teridentifikasi. Kemudian melakukan perbaikan stabilitas tegangan dengan memberikan kompensasi daya reaktif dengan *shunt capacitor* yang perubahan hasilnya dapat dievaluasi dengan melihat kurva PV.

4. Penarikan Kesimpulan Dan Penulisan Buku Laporan

Setelah memperoleh hasil analisa yang sesuai dengan yang diinginkan, selanjutnya penulis dapat menarik kesimpulan dan memperoleh solusi untuk memecahkan permasalahan yang ada. Keseluruhan pembahasan mulai dari awal permasalahan hingga solusi yang diperoleh dituangkan kedalam buku tugas akhir.

1.6 Sistematika penulisan

Pembahasan dalam tugas akhir ini dibagi kedalam 5 bab, yaitu sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat, metodologi, dan sistematika penulisan.

BAB II : LANDASAN TEORI

Pada bab ini dijelaskan tentang landasan teori yang terdiri dari sistem tenaga listrik, sistem transmisi tenaga listrik, aliran daya, kestabilan sistem tenaga listrik, teori sensitivitas dan pengaruh kompensasi daya reaktif pada sistem tenaga listrik.

BAB III : PEMODELAN SISTEM

Pada bab ini dijelaskan tentang pemodelan sistem dengan menggunakan *software PowerWorld*, data-data kelistrikan yang terdiri dari data pembangkitan, data saluran dan data beban, konfigurasi serta hal-hal yang berkaitan dengan operasi sistem kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV. Bab ini juga menjelaskan metodologi simulasi yang dilakukan.

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini dijelaskan tentang hasil simulasi *power flow* dan kurva PV beserta analisa-analisanya mengenai identifikasi *weak bus* melalui perhitungan sensitivitas yang dilakukan *PowerWorld* dan peningkatan stabilitas tegangan dengan memasang kapasitor pada bus yang telah teridentifikasi lemah pada sistem transmisi Sumatra Utara 150/275 kV tahun 2024.

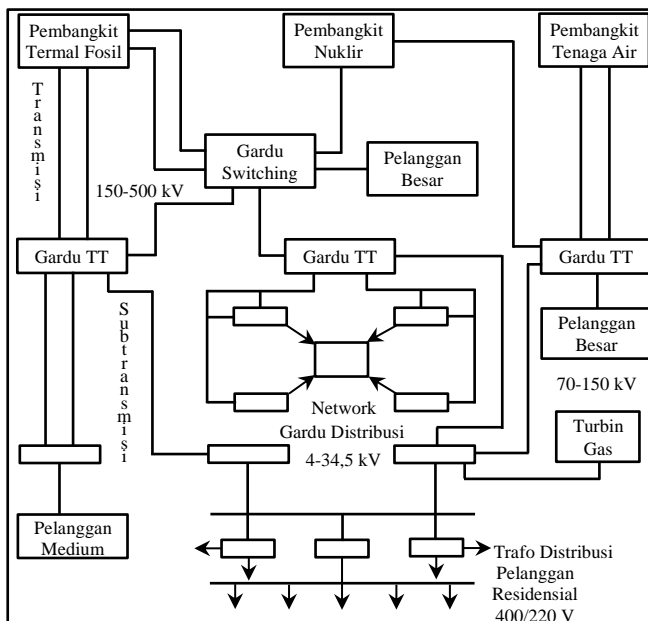
BAB V : PENUTUP

Pada bab ini berisikan kesimpulan dan saran yang diperoleh dari hasil seluruh rangkaian studi kasus yang telah dilakukan.

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Dalam hal ini, sistem tenaga listrik yang dimaksudkan adalah sekumpulan pusat pembangkit listrik dan pusat beban (Gardu Induk) yang satu sama lain dihubungkan oleh jaringan transmisi sehingga menjadi kesatuan sistem interkoneksi. Seiring dengan perkembangan penggunaan energi listrik oleh pelanggan, pelayanan sistem tenaga listrik yang ada, juga berkembang mengikuti perkembangan para pengguna tenaga listrik yang dilayaninya [2]. Dalam perkembangannya, perusahaan penyedia tenaga listrik berupaya agar energi listrik dapat dinikmati oleh masyarakat terpencil yang terisolir. Misalnya dengan membangun pembangkit-pembangkit dalam skala kecil (seperti PLTD dan PLTMH) untuk memenuhi kebutuhan listrik pelanggan.



Gambar 2.1 Ilustrasi interkoneksi sistem tenaga listrik

Gambar 2.1 memperlihatkan ilustrasi sistem tenaga listrik yang saling terinterkoneksi. Secara umum sistem tenaga listrik dapat dibagi kedalam 3 subsistem utama yaitu, sistem pembangkitan, sistem penyaluran (transmisi) dan sistem distribusi. Untuk sistem tenaga listrik interkoneksi yang besar, peralatan-peralatan yang menunjang untuk pelayanan tenaga listrik dikontrol oleh sistem kecerdasan buatan mulai dari *telemetering*, *telesignaling* dan *telecontrolloing* sehingga dikenal dengan istilah sistem tenaga listrik modern.

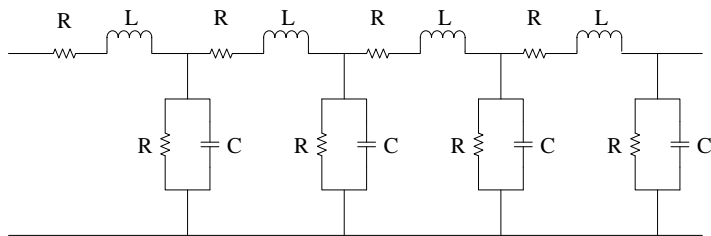
2.2 Sistem Pembangkit Tenaga Listrik

Pusat pembangkit tenaga listrik merupakan tempat penghasil tenaga listrik, yang dihasilkan oleh generator-generator yang diputar oleh turbin sebagai penggerak mula (*prime mover*) [2]. Tenaga yang digunakan untuk menggerakkan turbin ini berasal dari berbagai macam sumber energi, dapat berasal dari uap panas yang sering disebut PLTU, dari gas uap disebut PLTGU, dari air disebut PLTA, dari panas bumi disebut PLTP, dari nuklir disebut PLTN, dari angin, cahaya matahari, ombak laut dan sebagainya. Secara umum, pembangkit tenaga listrik ada yang menggunakan energi terbarukan dan ada yang menggunakan energi fosil sebagai penghasil penggerak utamanya. Besar tegangan yang dihasilkan oleh generator berada pada kisaran 6 kV s.d 24 kV dan akan dinaikan menjadi 150 kV, 275 kV atau 500 kV melalui *transformator step up* yang berada di Gardu Induk Pusat kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi menuju ke pusat-pusat beban yang tersebar. Pada sistem interkoneksi, pembangkit yang masuk kedalam sistem lebih dari satu generator sehingga dalam memenuhi permintaan beban perlu adanya pengaturan berapa daya yang harus dibangkitkan oleh masing-masing generator. Di pembangkitan tenaga listrik, generator merupakan peralatan yang utama sebagai penghasil tenaga listrik sehingga dalam menjalankan operasinya perlu dipasang peralatan proteksi dan dilakukan pemeliharaan secara terjadwal [3].

2.3 Sistem Transmisi [4]

Sistem transmisi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berperan untuk mentransfer energi listrik dari pembangkit menuju pusat-pusat beban. Saluran transmisi yang saling terkoneksi satu dengan lainnya tidak hanya untuk keperluan *economic dispatch* daya listrik dalam suatu regional dalam kondisi normal, tetapi juga untuk keperluan transfer daya antara suatu regional dalam kondisi darurat. Sebagian

besar, saluran transmisi tenaga listrik di Indonesia dibangun dengan tipe saluran transmisi udara dengan variasi tegangan mulai dari 70 kV, 150 kV, 275 kV sering disebut SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) dan 500 kV sering disebut SUTET (Saluran Udara Tegangan Extra Tinggi). Saluran transmisi di Indonesia sebagian besar juga terhubung interkoneksi untuk transmisi dalam suatu pulau. Secara umum saluran transmisi tenaga listrik dapat dimodelkan sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Model saluran transmisi tenaga listrik

Semua saluran transmisi dalam suatu sistem tenaga merepresentasikan sifat kelistrikan seperti resistansi, induktansi, kapasitansi dan konduktansi. Induktansi dan kapasitansi memiliki pengaruh medan magnet dan medan listrik disekitar konduktor. Parameter-parameter ini sangat penting untuk pengembangan model saluran transmisi yang digunakan dalam analisa sistem tenaga.

Besar kecilnya parameter-parameter tersebut sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor antarlain, jenis konduktor yang digunakan, jenis konfigurasi yang bangun, temperatur sekitar dan jarak saluran. Dalam saluran transmisi juga dijumpai fenomena-fenomena kelistrikan seperti rugi daya, rugi tegangan, *under voltage* dan *over voltage*, yang kesemuanya sangat dipengaruhi oleh parameter-parameter sebagaimana yang disebutkan diatas.

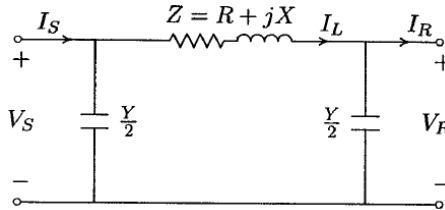
Saluran transmisi seperti yang terlihat pada gambar 2.2 merupakan model dengan pendekatan parameter per fase. Tegangan terminal dinyatakan sebagai tegangan *line to netral* dan arus dinyatakan sebagai arus per fase. Pemodelan saluran transmisi digunakan untuk memudahkan dalam melakukan perhitungan tegangan, arus dan aliran daya yang akan bergantung pada panjang saluran. Berdasarkan analisis pendekatan, pemodelan saluran transmisi yang paling akurat adalah yang memperhitungkan seluruh parameter yang ada.

2.3.1 Model Saluran Transmisi Menengah

Saluran transmisi menengah merupakan saluran yang memiliki panjang diatas 80 km (50 mile) dan kurang dari 250 km (150 mile). Dengan meningkatnya panjang saluran, arus *charging* saluran menjadi cukup besar sehingga kapasitansi *shunt* harus diperhitungkan. Untuk saluran transmisi menengah, saluran dapat direpresntasikan dalam 2 model, yaitu : model nominal π dan model nominal T.

2.3.1.1 Model PI (π)

Model nominal π , sebagaimana diperlihatkan oleh gambar 2.3. Pada saluran transmisi model nominal π , setengah nilai *shunt* kapasitansi saluran ($Y/2$) ditempatkan pada awal dan akhir saluran. Sedangkan total impedansi seri saluran (Z) diapit oleh setengah nilai *shunt* kapasitansinya.



Gambar 2.3 Model saluran transmisi menengah nominal π

Dari model saluran diatas, menurut HKA (Hukum Kirchof Arus) arus pada impedansi seri (I_L) dinyatakan oleh persamaan 2.1.

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2} V_R \quad (2.1)$$

Sedangkan menurut HKT (Hukum Kirchof Tegangan) tegangan pada sisi kirim dinyatakan oleh persamaan 2.2.

$$V_S = V_R + Z I_L \quad (2.2)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.1 kedalam persamaan 2.2 diperoleh

$$V_S = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_R + Z I_R \quad (2.3)$$

Menurut HKA arus pada sisi kirim adalah

$$I_S = I_L + \frac{Y}{2} V_S \quad (2.4)$$

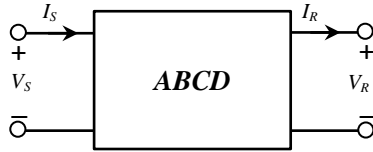
Dengan mensubstitusikan persamaan 2.1 dan kedalam persamaan 2.4 diperoleh

$$I_S = Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) V_R + \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \quad (2.5)$$

Persamaan-persamaan diatas dapat dinyatakan dalam rangkaian konstanta secara umum yang dikenal dengan konstanta ABCD. Persamaan umum konstanta ABCD tersebut dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$V_S = A V_R + B I_R \quad (2.6)$$

$$I_S = C V_R + D I_R \quad (2.7)$$



Gambar 2.4 Model saluran transmisi dengan konstanta ABCD

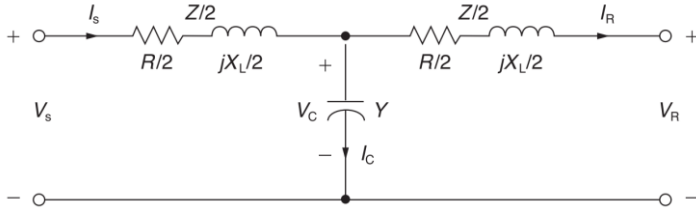
Dari persamaan 2.6 dan 2.7 diperoleh konstanta ABCD untuk model saluran transmisi menengah nominal π sebagai berikut

$$A = \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) \quad B = Z \quad (2.8)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) \quad D = \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) \quad (2.9)$$

2.3.1.2 Model T

Model saluran transmisi menengah nominal T diperlihatkan oleh gambar 2.5 dengan setengah impedansi seri saluran direpresentasikan diawal dan akhir saluran. Sedangkan *shunt* kapasitansi total dipusatkan pada pertengahan saluran.



Gambar 2.5 Model saluran transmisi menengah nominal T

Dari model saluran diatas, menurut HKA (Hukum Kirchof Arus) arus pada sisi kirim (I_S) dinyatakan oleh persamaan 2.10

$$I_S = I_R + V_C Y \quad (2.10)$$

Dimana

$$V_C = V_R + I_R \frac{Z}{2} \quad (2.11)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.11 kedalam persamaan 2.10 diperoleh

$$I_S = Y V_R + \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) I_R \quad (2.12)$$

Tegangan pada sisi kirim adalah

$$V_S = V_C + I_S \frac{Z}{2} \quad (2.13)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.11 dan 2.12 kedalam persamaan 2.13 diperoleh

$$V_S = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_R + Z \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) I_R \quad (2.14)$$

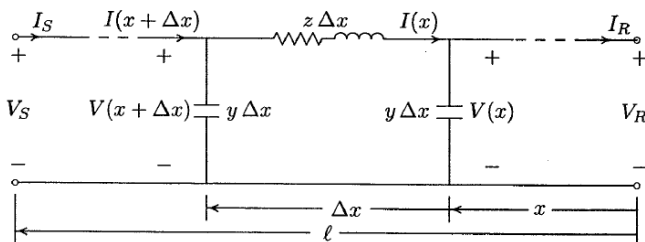
Dari persamaan 2.12 dan 2.14 diperoleh konstanta ABCD untuk model saluran transmisi menengah nominal T sebagai berikut

$$A = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) \quad B = Z \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) \quad (2.15)$$

$$C = Y \quad D = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) \quad (2.16)$$

2.3.2 Model Saluran Transmisi Panjang

Saluran transmisi yang memiliki panjang lebih dari 250 km (150 mile) termasuk kedalam kategori saluran transmisi panjang. Berbeda dengan model saluran transmisi pendek dan menengah, pada model saluran transmisi panjang parameter saluran terdistribusi dengan lebih akurat. Akibatnya apabila suatu saluran transmisi dianalisa dengan menggunakan ketiga model diatas, maka akan terdapat perbedaan yang cukup besar. Rangkaian pengganti saluran transmisi panjang diperlihatkan oleh gambar 2.6. Gambar 2.6 menunjukkan ketidakberagaman panjang saluran dengan perubahan jarak Δx pada jarak x dari sisi terima, dengan impedansi seri $z.\Delta x$ dan admitansi $y.\Delta x$, dimana z dan y masing-masing adalah impedansi dan admitansi per satuan panjang.



Gambar 2.6 Model saluran transmisi panjang

Dengan mengacu pada persamaan umum konstanta ABCD saluran transmisi sebagaimana dinyatakan oleh persamaan 2.6 dan 2.7, nilai konstanta ABCD untuk saluran transmisi panjang dinyatakan sebagai berikut

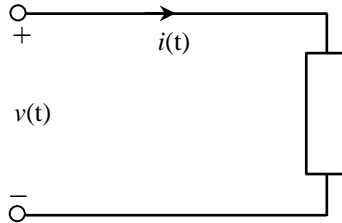
$$A = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) \quad B = Z \left(1 + \frac{YZ}{6}\right) \quad (2.17)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{YZ}{6}\right) \quad D = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) \quad (2.18)$$

2.4 Daya Listrik Pada Sistem AC [3]

Secara umum daya dapat diartikan sebagai energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Pada sistem tenaga listrik, daya menggambarkan transfer energi suatu peralatan listrik yang dinyatakan dalam tegangan dan arus. Satuan daya listrik adalah watt. Suplai

tegangan pada sistem ac merupakan sumber sinusoidal yang merupakan fungsi waktu, sehingga arus yang dihasilkan dalam rangkaian juga merupakan arus sinusoidal.



Gambar 2.7 Rangkaian listrik dengan suplai sinusoidal

Dari rangkaian diatas, tegangan sesaat adalah

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi_v) \quad (2.19)$$

Dan arus sesaat adalah

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi_i) \quad (2.20)$$

Daya sesaat $p(t)$ yang dikirim ke beban merupakan perkalian antara tegangan sesaat $v(t)$ dan arus sesaat $i(t)$, dinyatakan sebagai berikut.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \phi_v) \cos(\omega t + \phi_i) \quad (2.21)$$

dengan menggunakan identitas trigonometri

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A-B) + \frac{1}{2} \cos(A+B) \quad (2.22)$$

Maka didapatkan persamaan baru untuk $p(t)$

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{1}{2} V_m I_m [\cos(\phi_v + \phi_i) + \cos(2\omega t + \phi_v + \phi_i)] \\ &= \frac{1}{2} V_m I_m [\cos(\phi_v + \phi_i) + \cos 2(\omega t + \phi_v) \cos(\phi_v + \phi_i) \\ &\quad + \sin 2(\omega t + \phi_v) \sin(\phi_v + \phi_i)] \end{aligned} \quad (2.23)$$

Nilai rms dari $v(t)$ adalah $|V| = V_m / \sqrt{2}$ dan nilai rms dari $i(t)$ adalah $|I| = I_m / \sqrt{2}$. Apabila dimisalkan $\phi = \phi_v - \phi_i$, dimana ϕ merupakan beda sudut antara tegangan dan arus atau sudut impedansi. Sehingga dalam nilai rms, persamaan diatas menjadi

$$p(t) = |V| |I| \cos \phi [1 + \cos 2(\omega t + \phi_v)] + |V| |I| \sin \phi \sin 2(\omega t + \phi_v) \quad (2.24)$$

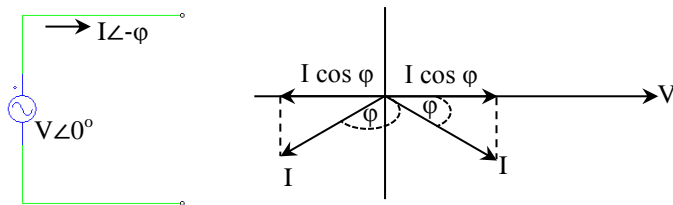
Daya sesaat sebagaimana dinyatakan oleh persamaan 2.24 terdiri dari dua komponen. Komponen pertama dari persamaan diatas merupakan rata-rata daya aktif (P), sedangkan komponen keduanya merupakan daya yang ditransfer bolak-balik antara sumber dan beban (daya reaktif (Q)).

2.4.1 Daya Aktif (P = Watt)

Daya aktif merupakan daya yang diserap oleh komponen resistif beban. Daya aktif diperoleh dari hasil perkalian antara nilai rms tegangan dan nilai rms arus dikalikan dengan cosinus sudut antara tegangan dan arus (ϕ). Secara matematis dirumuskan sebagai berikut

$$P = |V| |I| \cos \phi \quad (2.25)$$

Dikarenakan $\cos \phi$ memegang peranan penting dalam menentukan rata-rata daya, maka $\cos \phi$ dikenal dengan istilah faktor daya. Ketika arus tertinggal dari tegangan disebut faktor daya *lagging*, dan ketika arus mendahului tegangan disebut faktor daya *leading*.



Gambar 2.8 Aliran daya aktif

Aliran daya aktif pada suatu rangkaian listrik adalah :

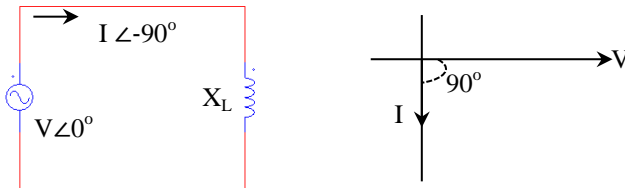
1. Apabila $I \cos \phi$ sefase dengan V , berarti daya listrik dibangkitkan, sumber merupakan generator dan arus keluar dari terminal positif.
2. Apabila $I \cos \phi$ mempunyai beda fase 180° terhadap V , berarti daya listrik diserap, sumber merupakan motor dan arus menuju terminal positif.

2.4.2 Daya Reaktif ($Q = VAr$)

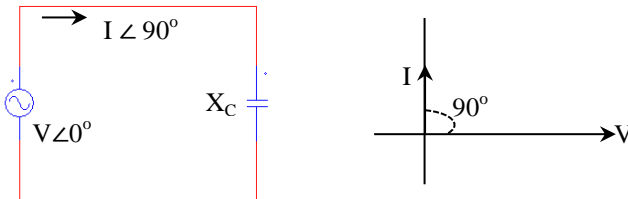
Daya reaktif merupakan daya yang tersimpan dan yang dilepaskan dalam bentuk medan magnet dari sebuah induktor dan dalam medan listrik dari sebuah kapasitor. Daya aktif diperoleh dari hasil perkalian antara nilai rms tegangan dan nilai rms arus dikalikan dengan sinus sudut antara tegangan dan arus (ϕ). Secara matematis dirumuskan sebagai berikut

$$Q = |V| |I| \sin \phi \quad (2.26)$$

Daya reaktif sebesar $I^2 X_L$ bertanda positif berarti induktansi menyerap daya reaktif dan arus I tertinggal 90° dari tegangan V sebagaimana ditampilkan oleh gambar 2.9. Daya reaktif sebesar $I^2 X_C$ bertanda negatif berarti kapasitansi menyuplai daya reaktif dan arus I mendahului tegangan V sebesar 90° sebagaimana ditampilkan oleh gambar 2.10.



Gambar 2.9 Aliran daya reaktif induktif



Gambar 2.10 Aliran daya reaktif kapasitif

2.4.3 Daya Kompleks ($S = VA$)

Daya kompleks merupakan representasi daya yang diserap oleh beban listrik yang terdiri dari beban resistif, induktif maupun kapasitif. Daya kompleks diperoleh dari hasil perkalian antara nilai rms tegangan dan nilai rms arus. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut

$$S = V I^* \quad (2.27)$$

Hubungan daya aktif, daya reaktif dan daya kompleks menghasilkan sebuah istilah yang disebut dengan segitiga daya. Gambar 2.11 memperlihatkan segitiga daya, dimana garis *real* merepresentasikan daya aktif, garis imajiner merepresentasikan daya reaktif dan garis diagonal merepresentasikan daya semu.



Gambar 2.11 Segitiga daya (a) beban induktif (b) beban kapasitif

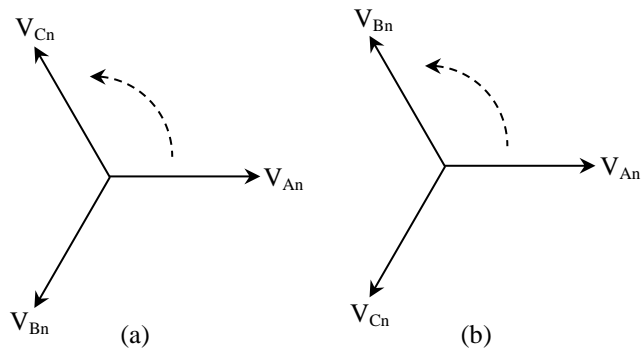
Dari gambar 2.11 diatas diperoleh persamaan segitiga daya sebagai berikut

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.28)$$

2.4.4. Rangkaian Listrik Tiga Fase [5]

Pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi tenaga listrik dibangun dengan rangkaian listrik tiga fase. Di pusat pembangkitan listrik, generator membangkitkan tegangan tiga fase sinusoidal yang mempunyai amplitudo sama dan antar fase terpisah sebesar 120° sudut listrik. Apabila tegangan yang dibangkitkan mempunyai urutan ABC, maka generator mempunyai urutan fase positif sebagaimana diperlihatkan gambar 2.12 (a). Sebaliknya apabila tegangan yang dibangkitkan mempunyai urutan ACB, maka generator mempunyai urutan negatif sebagaimana diperlihatkan gambar 2.12 (b).

Pada urutan positif, tegangan yang dibangkitkan mempunyai sudut $V_{An} = V \angle 0^\circ$, $V_{Bn} = V \angle -120^\circ$, $V_{Cn} = V \angle 120^\circ$. Pada urutan negatif, tegangan yang dibangkitkan mempunyai urutan $V_{An} = V \angle 0^\circ$, $V_{Bn} = V \angle 120^\circ$, $V_{Cn} = V \angle -120^\circ$.



Gambar 2.12 Urutan fase (a) positif/abc (b) negatif/acb

Dari rangkaian tiga fase baik hubungan Y maupun delta, diperoleh persamaan daya untuk sistem tenaga listrik tiga fase sebagai berikut.

$$P = \sqrt{3}|V| |I| \cos \phi \quad (2.29)$$

$$Q = \sqrt{3}|V| |I| \sin \phi \quad (2.30)$$

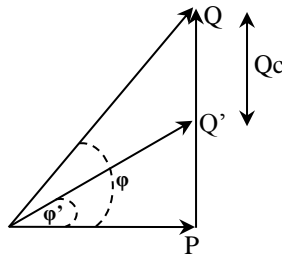
$$S = \sqrt{3} V I^* \quad (2.31)$$

V merupakan tegangan *line to line* dan I merupakan arus saluran.

2.4.5 Koreksi Faktor Daya (Cos ϕ) [6]

Faktor daya merupakan faktor penentu antara hubungan daya aktif dan daya semu. Bahwa daya semu (S) akan bernilai lebih besar dari daya aktif (P) apabila faktor daya kurang dari 1. Faktor daya memiliki nilai antara 0 – 1, bersifat *lagging* apabila induktif dan bersifat *leading* apabila kapasitif. Semakin mendekati nilai 1, maka faktor daya menjadi semakin bagus begitupun sebaliknya. Sebagian besar beban tenaga listrik yang terhubung ke sistem merupakan beban bersifat induktif, artinya faktor daya bersifat *lagging*. Untuk daya aktif yang sama dengan nilai faktor daya semakin kecil akibat beban induktif yang besar, maka arus yang disuplai ke beban menjadi besar. Bagi perusahaan penyedia tenaga listrik, penambahan suplai arus ke beban harus diikuti dengan penambahan biaya produksi listrik sedangkan nilai jual yang terhitung tetap (kWh).

Sebagai solusinya, perusahaan penyedia tenaga listrik menghimbau kepada konsumen yang menggunakan beban induktif besar untuk dapat memperbaiki faktor daya sehingga mampu mempertahankan faktor daya pada nilai yang diijinkan. Solusi ini berangkat dari persamaan segitiga daya sebagaimana dibahas sebelumnya, yaitu dengan memberikan daya reaktif kapasitif (Q_c) yang akan melawan daya reaktif induktif (Q_L), sehingga daya reaktif menjadi berkurang.



Gambar 2.13 Koreksi faktor daya

Apabila faktor daya dengan sudut ϕ ingin diperbaiki menjadi faktor daya dengan sudut ϕ' maka dapat ditentukan berapa daya reaktif kapasitif yang harus diberikan. Berikut perhitungannya.

$$Q = P \tan \phi \quad (2.32)$$

$$Q' = P \tan \phi' \quad (2.33)$$

Dimana daya reaktif kapasitif (Q_c) yang harus diberikan adalah

$$\begin{aligned} Q_c &= Q - Q' \\ &= P (\tan \phi - \tan \phi') \end{aligned} \quad (2.34)$$

2.5 Analisa Aliran Daya [3]

Analisa aliran daya pada sistem tenaga listrik merupakan analisa penting yang harus dilakukan yang akan membantu dalam melaksanakan kegiatan operasi sistem dan juga sebagai pertimbangan dalam perencanaan sistem tenaga listrik. Dalam analisa aliran daya sistem tenaga ada dua parameter yang menjadi tujuan analisa yaitu untuk mengetahui tegangan pada setiap bus dan untuk mengetahui aliran daya pada setiap saluran transmisi. Dengan mengetahui parameter tersebut, maka besaran-besaran listrik seperti daya aktif P , daya reaktif Q , daya semu S , arus saluran, tegangan bus dan sudut fase juga bisa

dihitung. Adapun tujuan dilakukannya analisa aliran daya terhadap sistem tenaga listrik diantaranya adalah

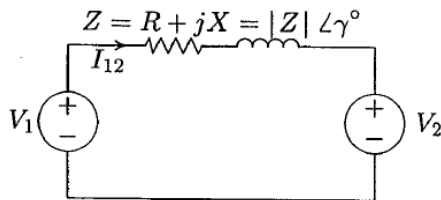
1. Untuk mengetahui besaran dan sudut tegangan disetiap bus.
2. Untuk mengevaluasi kemampuan semua peralatan yang terpasang pada sistem apakah masih dalam batasan kemampuan peralatan untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
3. Sebagai langkah awal untuk melakukan studi-studi analisa sistem tenaga selanjutnya, seperti studi hubung singkat, studi transiet, studi koordinasi proteksi dan studi kestabilan sistem.

Dalam sistem tenaga listrik, bus-bus memiliki 3 identitas yang berbeda, yaitu :

1. Bus Slack atau Swing
Bus ini terhubung dengan generator dan magnitud dan sudut tegangan generator diketahui dan tetap. Sedangkan nilai P dan Q dari generator dihitung.
2. Bus Generator atau PV
Bus ini terhubung dengan generator dan nilai daya aktif P dan magnitud tegangan generator diketahui dan tetap. Sedangkan nilai daya reaktif Q dan sudut tegangan dihitung.
3. Bus Load atau PQ
Bus ini terhubung dengan beban dan nilai daya aktif P dan daya reaktif Q dari beban diketahui dan tetap. Sedangkan magnitud dan sudut tegangan beban dihitung.

2.5.1 Aliran Daya Kompleks

Aliran daya kompleks merepresentasikan daya yang mengalir dari suatu bus ke bus lainnya. Untuk mempermudah analisa aliran daya, diilustrasikan sistem tenaga dengan jumlah bus 2, dimana antar bus tersebut terhubung oleh suatu saluran transmisi.



Gambar 2.14 Ilustrasi aliran daya sistem 2 bus

Gambar 2.14 diatas menunjukkan aliran daya dari bus 1 ke bus 2. Pada bus 1 terdapat sumber V_1 dan bus 2 terdapat sumber V_2 yang masing-masing terhubung oleh saluran transmisi dengan impedansi Z . Dari rangkaian diatas dapat diketahui

$$\begin{aligned} I_{12} &= \frac{V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2}{Z \angle \gamma} \\ &= \frac{V_1}{Z} \angle (\delta_1 - \gamma) - \frac{V_2}{Z} \angle (\delta_2 - \gamma) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Daya kompleks (S_{12}) yang mengalir dari bus 1 ke bus 2 adalah

$$\begin{aligned} S_{12} &= V_1 I_{12}^* \\ &= V_1 \angle \delta_1 \left[\frac{V_1}{Z} \angle (\gamma - \delta_1) - \frac{V_2}{Z} \angle (\gamma - \delta_2) \right] \\ &= \frac{V_1^2}{Z} \angle \gamma - \frac{V_1 V_2}{Z} (\gamma + \delta_1 - \delta_2) \end{aligned} \quad (2.36)$$

Dan daya aktif (P_{12}) dan daya reaktif (Q_{12}) yang mengalir dari bus 1 ke bus 2 masing-masing adalah

$$P_{12} = \frac{V_1^2}{Z} \cos \gamma - \frac{V_1 V_2}{Z} \cos(\gamma + \delta_1 - \delta_2) \quad (2.37)$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2}{Z} \sin \gamma - \frac{V_1 V_2}{Z} \sin(\gamma + \delta_1 - \delta_2) \quad (2.38)$$

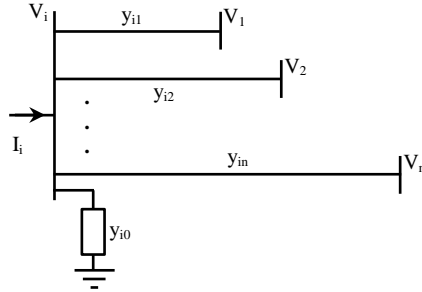
Pada saluran transmisi sistem tenaga listrik nilai resistansi lebih kecil daripada reaktansi, sehingga apabila nilai resistansi saluran diabaikan ($Z = X \angle 90^\circ$), maka P_{12} dan Q_{12} menjadi

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.39)$$

$$Q_{12} = \frac{V_1}{X} [V_1 - V_2 \cos(\delta_1 - \delta_2)] \quad (2.40)$$

2.5.2 Persamaan Aliran Daya

Persamaan aliran daya sistem tenaga listrik dari suatu bus ke bus-bus yang terhubung dengannya merupakan aplikasi dari hukum Kirchof arus. Untuk mendapatkan persamaan aliran daya dimisalkan dari suatu sistem tenaga listrik berikut.



Gambar 2.15 Representasi aliran daya pada bus

Dari gambar 2.15 diatas, bahwa persamaan aliran arus dari bus i adalah

$$I_i = y_{i0} V_i + y_{i1} (V_i - V_1) + y_{i2} (V_i - V_2) + \dots + y_{in} (V_i - V_n) \quad (2.41)$$

Dalam bentuk persamaan lain dapat dinyatakan sebagai berikut

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2.42)$$

Selanjutnya diketahui daya aktif dan daya reaktif pada bus i

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.43)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.44)$$

Dengan mensubstitusi persamaan ke persamaan, maka didapatkan

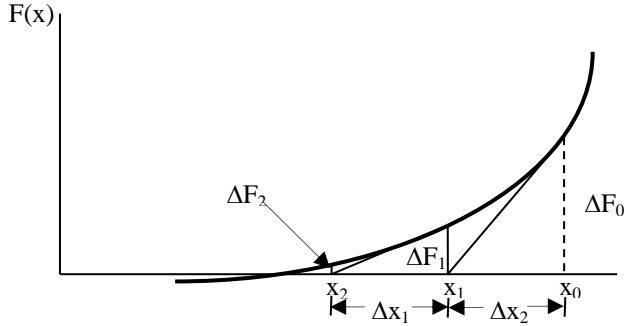
$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2.45)$$

Persamaan aliran daya yang dihasilkan diatas merupakan persamaan aljabar non linier, sehingga dalam penyelesaiannya harus melalui proses iterasi.

2.5.3 Aliran Daya Metode Newton Rhapson [5]

Metode Newton Rhapson merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menghitung aliran daya yang terjadi dalam sistem tenaga listrik. Penggunaan metode ini memiliki kelebihan yaitu dinilai lebih efisien dan lebih praktis, khususnya untuk solusi aliran daya sistem tenaga listrik dalam skala besar. Prinsip dasar dari Metode Newton

Rhapson ini adalah melakukan proses iterasi sampai memperoleh solusi akhir $f(x) = 0$ atau mendekati nilai ketelitian yang ditentukan, hal ini sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Solusi metode Newton Rhapson

Berangkat dari masalah persamaan matematis yang tidak linier, pemecahan masalah secara iteratif yang digunakan oleh metode Newton Rhapson adalah persamaan matematis deret Taylor.

$$f(x) = f(x_0) + \frac{1}{1!} \frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2f(x_0)}{dx^2} + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} \quad (2.46)$$

Dengan pendekatan linier, persamaan diatas menjadi

$$f(x) = f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) \quad (2.47)$$

$$\frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) = f(x) - f(x_0) \quad (2.48)$$

$$\frac{df(x_0)}{dx} \Delta x = \Delta f \quad (2.49)$$

Apabila dimisalkan arus yang masuk ke bus i adalah

$$I_i = \sum_{j=0}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \gamma_{ij} + \delta_j \quad (2.50)$$

Sehingga daya kompleks pada bus i adalah

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.51)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.50 ke persamaan 2.51, diperoleh

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=0}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \gamma_{ij} + \delta_j \quad (2.52)$$

Dari persamaan diatas, bagian real merupakan daya aktif dan bagian imajiner merupakan daya reaktif

$$P_i = \sum_{j=0}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\gamma_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.53)$$

$$Q_i = - \sum_{j=0}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\gamma_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.54)$$

Keterangan :

P_i : Daya aktif pada bus i.

Q_i : Daya reaktif pada bus i

$|Y_{ij}|, \gamma_{ij}$: Magnitud dan sudut elemen matrik Y baris i kolom j.

$|V_i|, \delta_i$: Magnitud tegangan dan sudut phasa pada bus i

$|V_j|, \delta_j$: Magnitud tegangan dan sudut phasa pada bus j

Setiap bus beban mempunyai dua persamaan yaitu persamaan 2.53 dan 2.54, sedangkan setiap bus generator hanya mempunyai satu persamaan yaitu persamaan 2.53. Dengan mengacu pada persamaan deret Taylor 2.49, dalam menemukan solusi aliran daya sistem tenaga listrik $|V|$ dan δ merupakan fungsi dari persamaan P_i dan Q_i .

Matrik jacobian diperoleh dari hubungan linier antara perubahan kecil pada sudut tegangan $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan magnitud tegangan $\Delta|V_i|^{(k)}$ dengan perubahan kecil pada daya aktif $\Delta P_i^{(k)}$ dan daya reaktif $\Delta Q_i^{(k)}$. Elemen matrik jacobian merupakan turunan parsial dari persamaan 2.53 dan 2.54. Konfigurasi matrik jacobian yang digunakan dalam perhitungan aliran daya diperlihatkan oleh persamaan matrik berikut ini.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Dimana elemen masing-masing matrik jacobian adalah

$$J1 \quad \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.57)$$

$$J2 \quad \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.58)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.59)$$

$$J3 \quad \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.60)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.61)$$

$$J4 \quad \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.63)$$

Setelah proses iterasi dilakukan, maka diperoleh nilai baru untuk sudut dan magnitud tegangan yang dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i \quad (2.64)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.65)$$

Keterangan :

(k+1) : Jumlah iterasi Newton Rhapsion

$\Delta \delta_i$: Perubahan sudut tegangan pada bus i

$\Delta |V_i|$: Perubahan magnitud tegangan pada bus i

Dan juga diperoleh persamaan

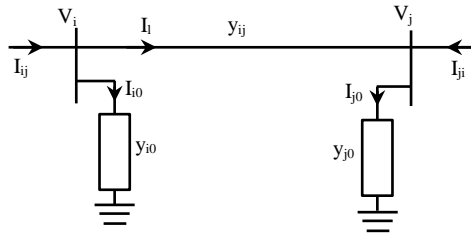
$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.66)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.67)$$

$\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ merupakan residual daya, yang diperoleh dari perbedaan antara daya coba (P_i^{sch}) dan daya hasil hitung proses iterasi ($P_i^{(k)}$). Proses iterasi akan berhenti setelah nilai residual $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ kurang dari nilai ketelitian yang ditentukan.

2.5.4 Rugi – Rugi Transmisi

Rugi-rugi transmisi pada saluran transmisi merupakan hal yang penting untuk diketahui, semakin kecil rugi transmisi maka keuntungan penjualan daya listrik akan meningkat begitupun sebaliknya. Pada sistem transmisi skala besar, perhitungan rugi-rugi transmisi baru dapat dihitung setelah mendapatkan solusi dari proses iterasi, sehingga magnitud dan sudut tegangan setiap bus diketahui.



Gambar 2.17 Aliran daya saluran transmisi

Rugi daya pada saluran transmisi seperti gambar diatas dapat dihitung dengan menggunakan turunan dari rumus-rumus berikut ini.

Arus saluran yang mengalir dari bus i ke bus j adalah

$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0} V_i \quad (2.68)$$

Dan arus saluran yang mengalir dari bus j ke bus i adalah

$$I_{ji} = -I_l + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0} V_j \quad (2.69)$$

Daya kompleks dari bus i ke bus j adalah

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.70)$$

Dan daya kompleks dari bus j ke bus i adalah

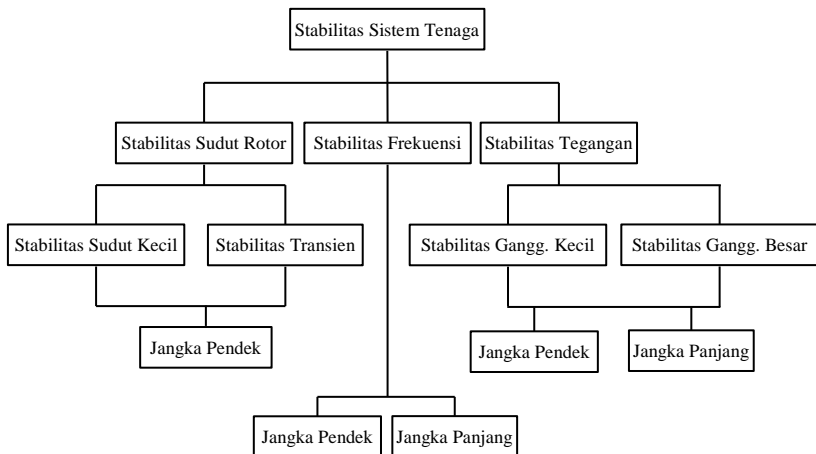
$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.71)$$

Rugi daya pada saluran i ke j merupakan penjumlahan aljabar dari S_{ij} dan S_{ji} .

$$S_{Lij}=S_{ij}+S_{ji} \quad (2.72)$$

2.6 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik [7]

Stabilitas tenaga listrik dapat diartikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi operasi tetap dalam keadaan seimbang baik pada waktu operasi normal maupun sesaat setelah sistem mengalami gangguan. Gambar 2.18 memperlihatkan keseluruhan masalah stabilitas pada sistem tenaga listrik.



Gambar 2.18 Klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik

Berdasarkan bagan diatas yang diperlihatkan oleh gambar 2.18, diketahui bahwa masalah stabilitas dalam sistem tenaga listrik terbagi kedalam tiga macam, yaitu stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi dan stabilitas tegangan.

2.6.1 Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor dapat diartikan sebagai kemampuan mesin-mesin sinkron pada sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi untuk tetap mempertahankan dalam keadaan sinkron pada semua kondisi operasi. Faktor utama dari masalah stabilitas ini adalah kondisi daya output dari mesin sinkron yang berubah-ubah pada saat rotor berosilasi. Stabilitas

sudut rotor memiliki kaitan erat dengan karakteristik dari mesin sinkron. Ketika dua atau lebih mesin sinkron terinterkoneksi, maka tegangan stator dan arus dari semua mesin harus memiliki frekuensi yang sama dan kecepatan rotornya harus mampu mensinkronkan dengan frekuensi yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, rotor dari semua mesin sinkron yang terinterkoneksi harus sinkron antara satu dengan yang lainnya. Fenomena stabilitas sudut rotor pada sistem tenaga listrik dibagi kedalam dua karakteristik, yaitu :

1. Stabilitas sudut rotor dengan sinyal atau gangguan kecil

Merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap menjaga kondisi sinkron ketika terjadi gangguan yang bersifat kecil. Misalnya terjadi gangguan yang bersifat kontinyu pada sistem tenaga akibat adanya perubahan kecil pada nilai beban dan pembangkitan. Ketidakstabilan ini bisa ditimbulkan oleh meningkatnya sudut rotor akibatnya kurangnya torsi sinkron dan atau meningkatnya amplitudo osilasi rotor akibat kurangnya torsi damping. Respon sistem terhadap gangguan kecil ini akan bergantung pada beberapa faktor, diantaranya kondisi operasi awal, kemampuan dan kekuatan sistem transmisi dan jenis kontrol eksitasi generator yang digunakan.

2. Stabilitas sudut rotor transien atau gangguan besar

Merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap menjaga kondisi sinkron ketika terjadi gangguan transien yang bersifat besar. Pada karakteristik ini, stabilitas akan bergantung pada keadaan kondisi operasi awal sistem dan tingkat gangguan yang terjadi. Umumnya, kondisi operasi *steady state* setelah gangguan akan berbeda dengan kondisi operasi sebelum gangguan. Pada saluran transmisi, karakteristik gangguan ini bisa terjadi akibat hubung singkat dan peralatan *circuit breaker* berperan untuk menghilangkan gangguan tersebut untuk memisahkan antara daerah yang mengalami gangguan dan yang tidak mengalami gangguan.

Respon yang diberikan sistem pada saat terjadi gangguan ini akan bergantung pada besarnya penyimpangan sudut rotor generator dan ketidaklinearan antara hubungan sudut daya. Dalam menganalisa stabilitas transien suatu sistem, umumnya pengamatan dilakukan dalam range waktu 3 hingga 5 detik pasca gangguan, atau mungkin hingga 10 detik apabila sistem yang diamati lebih besar.

2.6.2 Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi dapat diartikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga untuk tetap mempertahankan frekuensi *steady state* ketika terjadi gangguan yang dapat mengakibatkan ketidakseimbangan antara kapasitas beban dan pembangkitan. Dalam sistem tenaga listrik, frekuensi sangat perlu untuk dijaga kestabilannya, karena frekuensi ini akan menentukan kualitas daya bagi pelanggan. Stabilitas frekuensi akan bergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara pembangkitan sistem dan permintaan beban. Penyimpangan besar akan terjadi pada frekuensi dan tegangan sistem, apabila ada penambahan aliran daya yang pada umumnya dapat menyebabkan gangguan sistem. Sesuai dengan gambar 2.18 berdasarkan watunya, ketidakstabilan frekuensi terbagi kedalam dua kategori, yaitu :

1. Bersifat Jangka Pendek

Merupakan ketidakstabilan frekuensi yang terjadi akibat kapasitas pembangkitan dan frekuensi *load shedding* yang tidak mencukupi. Hal ini akan menyebabkan sistem *blackout* dalam waktu beberapa detik.

2. Bersifat Jangka Panjang

Merupakan ketidakstabilan frekuensi yang terjadi akibat *over speed* pada turbin. Hal ini dimungkinkan terjadi pada kisaran waktu 10 detik keatas. Lemahnya stabilitas frekuensi sistem yang dihasilkan dari ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban, akan memiliki dampak yang signifikan terhadap besarnya tegangan, terutama pada saat kelebihan beban yang akan menyebabkan penurunan besarnya tegangan.

2.6.3 Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan dapat diartikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap mempertahankan tegangan *steady state* disemua bus, baik pada saat kondisi operasi normal dan atau pasca terjadinya gangguan. Faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuannya sistem dalam memenuhi permintaan daya reaktif. Tegangan drop pada saluran transmisi akan terjadi ketika arus dari bus sumber menuju bus beban melewati parameter transmisi (resistansi dan induktansi), sehingga besar tegangan disisi terima menjadi menurun. Sistem tenaga listrik dikatakan tidak stabil tegangannya apabila, magnitud tegangan pada bus tersebut menurun ketika permintaan daya reaktif pada bus tersebut meningkat.

Stabilitas tegangan dalam sistem tenaga listrik diklasifikasikan kedalam dua kategori, yaitu sebagai berikut :

1. Stabilitas tegangan dengan gangguan kecil

Merupakan kemampuan stabilitas sistem dalam mengontrol tegangan pada saat terjadi gangguan kecil seperti meningkatnya permintaan beban sistem. Adapun kemampuan stabilitas ini dapat ditentukan dari karakteristik beban kontrol kontinu dan diskrit yang diberikan pada saat waktu tertentu. Hal ini digunakan untuk menentukan respon tegangan sistem terhadap perubahan beban pada saat waktu tertentu. Sehingga dalam stabilitas tegangan dengan gangguan kecil ini, dapat dilakukan analisa statis yang dapat digunakan untuk menentukan batasan stabilitas dan mengidentifikasi faktor-faktor yang dapat mempengaruhi stabilitas sistem.

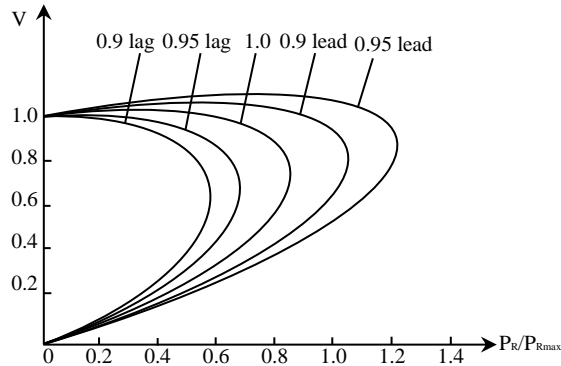
2. Stabilitas tegangan dengan gangguan besar

Merupakan kemampuan stabilitas sistem dalam mengontrol tegangan pada saat terjadi gangguan besar seperti hubung singkat dan atau kehilangan daya pembangkit. Adapun kemampuan stabilitas ini dapat ditentukan dari karakteristik beban sistem dan interaksi dari kontrol kontinu/diskrit dan proteksi. Stabilitas tegangan dengan gangguan besar memerlukan pengujian pada performansi dinamis nonlinier suatu sistem selama periode waktu tertentu (biasanya beberapa detik hingga 10 menit) untuk menggambarkan interaksi dari beberapa *device* seperti pembatas arus medan pada generator.

2.7 Kurva P-V

Dalam menganalisa stabilitas tegangan pada sistem tenaga listrik, diperlukan metode yang dapat menggambarkan kondisi tegangan disetiap bus sistem. Selain analisa *power flow* yang menjadi metode utama dalam melakukan analisa kestabilan tegangan, terdapat metode lainnya yang biasa digunakan yaitu analisa berdasarkan kurva PV. Gambar 2.19 menunjukkan contoh kurva PV dengan faktor daya bervariasi. Kurva PV tersebut merepresentasikan karakteristik beban P dalam suatu bus terhadap tegangan, terlihat bahwa semakin baik faktor daya beban, maka daya aktif (P) yang dapat ditransfer menuju beban menjadi semakin meningkat [8]. Dengan menganalisa kurva PV dalam stabilitas tegangan, akan diketahui berapa besar daya maksimum yang dapat ditransfer dengan batasan tegangan yang masih diijinkan. Kurva PV ini diperoleh dengan percobaan melakukan penambahan beban pada

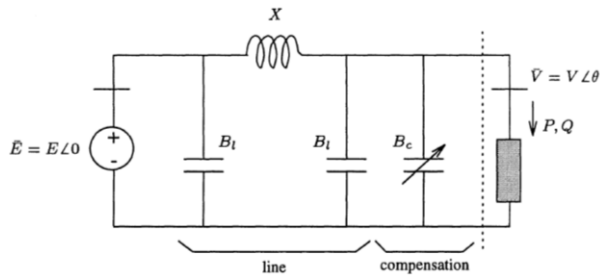
bus, sehingga akan diketahui pengaruh terhadap besaran tegangan pada bus tersebut hingga mencapai nilai kritis.



Gambar 2.19 Kurva PV

2.8 Kapasitor *Shunt*

Kompensasi dalam hal ini adalah kapasitor *shunt*, merupakan peralatan yang paling sederhana dan paling banyak digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif, dalam hal ini menyuplai daya reaktif sehingga transfer daya dan profil tegangan pada bus menjadi lebih baik [8]. Pemberian injeksi kapasitif pada bus beban juga dapat memperbaiki faktor daya beban, sehingga berdasarkan analisa kurva PV daya maksimum yang dapat ditransfer menjadi meningkat. Untuk memberikan penjelasan mengenai pengaruh pemasangan kapasitor *shunt* terhadap transfer daya dan profil tegangan pada sistem tenaga listrik diperlihatkan oleh gambar berikut.



Gambar 2.20 Konfigurasi kapasitor *shunt* pada bus

Gambar 2.20 diatas merepresentasikan tegangan sumber E dan tegangan beban V dimana keduanya terhubung oleh saluran transmisi yang dimodelkan dalam bentuk π dengan impedansi saluran X, admitansi saluran B_L dan pada bus beban terpasang kapasitor *shunt* B_c . Rangkaian *thevenin* dilihat dari sisi beban mendapatkan parameter *thevenin* sebagai berikut.

Tegangan *thevenin* (E_{th}):

$$E_{th} = \frac{E}{1 - (B_L + B_c)X} \quad (2.73)$$

Impedansi *thevenin* (X_{th}):

$$X_{th} = \frac{X}{1 - (B_L + B_c)X} \quad (2.74)$$

Daya maksimum yang dapat ditransfer dengan faktor daya ($\cos \emptyset$) adalah

$$\begin{aligned} P_{maks} &= \frac{\cos \emptyset}{1 + \sin \emptyset} \frac{E_{th}^2}{2X_{th}} \\ &= \frac{1}{1 - (B_L + B_c)X} \frac{\cos \emptyset}{1 + \sin \emptyset} \frac{E^2}{2X} \end{aligned} \quad (2.75)$$

Dan tegangan bus beban adalah

$$\begin{aligned} V_{maksP} &= \frac{E_{th}}{\sqrt{2} \sqrt{1 + \sin \emptyset}} \\ &= \frac{1}{1 - (B_L + B_c)X} \frac{E}{\sqrt{2} \sqrt{1 + \sin \emptyset}} \end{aligned} \quad (2.76)$$

Dari kedua persamaan diatas 2.75 dan 2.76, diketahui bahwa P_{maks} dan V_{maksP} akan meningkat apabila *line charging* diperhitungkan dan atau apabila diberikan injeksi kompensasi daya reaktif kapasitor *shunt* pada bus beban.

2.9 PowerWorld Simulator 19

PowerWorld Simulator merupakan *software* komersial yang dikeluarkan oleh *PowerWorld Corporation* yang dirancang secara khusus untuk simulasi dan analisis sistem ketenagalistrikan daya tinggi. *Software* ini memiliki kemampuan untuk memecahkan permasalahan

kelistrikan dengan skala besar bahkan bisa mencapai ratus ribuan bus. Yang membedakan dengan *software* simulasi ketenagalistrikan lainnya, *PowerWorld Simulator* menyediakan *tools* yang mudah untuk digunakan bagi pengguna sehingga menjadi lebih interaktif dan mempunyai visualisasai dengan grafis yang tinggi.

Pemodelan sistem kelistrikan pada *PowerWorld Simulator* dilakukan menggunakan *toolbar Draw* yang telah menyediakan komponen-komponen kelistrikan daya tinggi seperti *bus*, *generator*, *transmission line*, *switched shunt*, *transformer*, *load* dan lain sebagainya. Tentunya dengan sangat mudah untuk menghubungkan antar komponen-komponen kelistrikan tersebut yaitu dengan cara klik dimana dan atau kemana komponen tersebut akan diletakan. *PowerWorld Simulator* juga telah menyediakan fitur yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini. Diantaranya adalah *power flow tools* digunakan untuk mendapatkan solusi aliran daya pada sistem kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV dengan menggunakan metode Newton Rapsion dan penentuan *weak bus* dengan menggunakan *sensitivities*. Saat proses *run load flow*, *software* ini menampilkan animasi arah dan besar kecilnya aliran daya pada setiap saluran yang saling terhubung antar bus. Pengguna juga bisa memanfaatkan fasilitas *Case Information* yang menyediakan data-data lengkap atau ringkasan baik sebelum maupun setelah program dijalankan, sehingga memudahkan bagi pengguna untuk memperoleh data-data hasil analisa tersebut. Data-data tersebut dapat berupa data daya yang dibangkitkan generator, data magnitud dan sudut fase tegangan setiap bus dan data rugi-rugi saluran.

PowerWorld Simulator juga menyediakan fitur lainnya sebagai tambahan yang bisa dioperasikan melalui *toolbar Add-on* diantaranya adalah analisis *Optimal Power Flow* (OPF), analisis *PV and QV Curves* (PVQV) dan analisa *Transient Stability* (TS).

2.10 Sensitivitas Tegangan

Dalam sistem tenaga listrik, sensitivitas tegangan dapat diartikan sebagai keadaan tegangan pada suatu bus jika dilakukan penambahan beban, atau dengan keadaan normal apabila dilakukan aliran daya, keadaan beban pada bus beban tidak mengalami penurunan [10]. Perubahan tegangan pada bus beban terjadi diakibatkan adanya penambahan beban. Secara matematis, hubungan penurunan tegangan

pada bus terhadap penambahan beban menghasilkan suatu nilai yang dinyatakan oleh persamaan berikut.

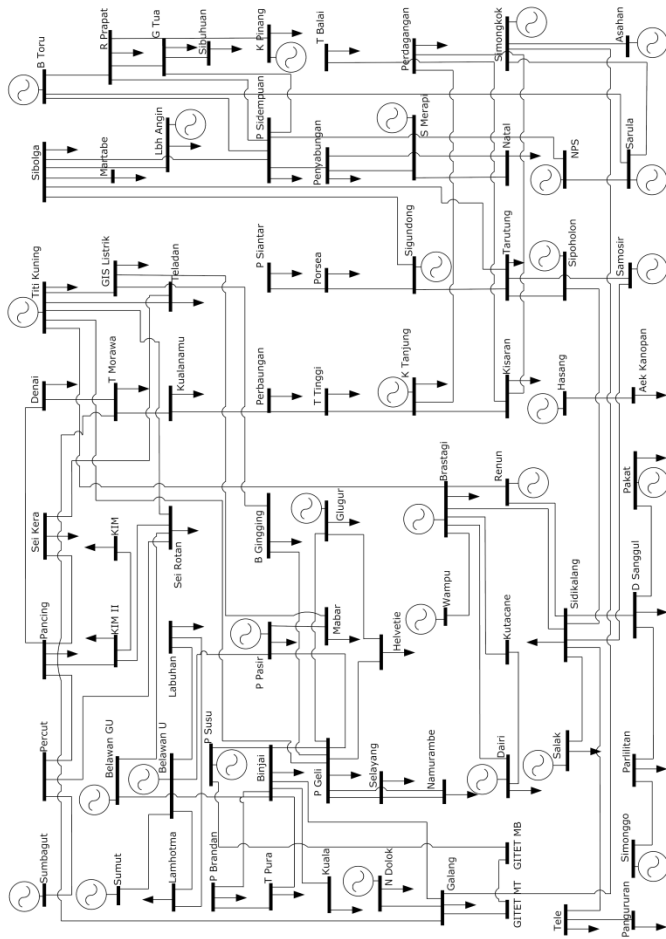
$$\frac{dV_i}{dP_{\text{total}}} \quad (2.77)$$

Persamaan 2.77 diatas diambil sebagai indek sensitivitas tegangan, dimana dV_i merepresentasikan perubahan tegangan pada bus i (per unit) dan dP_{total} merepresentasikan total perubahan beban daya aktif (MW) [11]. Dalam menghasilkan nilai sensitivitas ini, setiap bus beban pada sistem mendapat penambahan beban secara proporsional sampai pembangkitan maksimum sistem tercapai. Semakin besar drop tegangan pada bus, maka indek sensitivitas yang diperoleh akan semakin besar pula. Sehingga dengan persamaan 2.77 ini, kita dapat mengetahui bus sistem yang mengalami penurunan tegangan terbesar.

PEMODELAN SISTEM

3.1 Data Sistem Kelistrikan Sumut 150/275 kV

Single line diagram sistem kelistrikan Sumut 150/275kV yang digunakan pada tugas akhir ini digambarkan oleh gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV 2024

Data saluran sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV yang digunakan dalam melakukan simulasi diperlihatkan oleh Tabel 3.1, ditentukan MVA base 100 MVA, kV base 150 kV dengan impedansi base 225 Ω dan admitansi base 0,00444444 U dan kV base 275 kV dengan impedansi base 756,25 Ω dan admitansi base 0,00132231 U .

Tabel 3.1 Data saluran sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
B_K. Tanjung	B_Perdagangan	0,02410	0,07930	0,02584
B_Kuta Cane (NAD)	B_Dairi	0,07515	0,19188	0,06622
B_Panyabungan	B_P. Sidempuan	0,00770	0,07890	0,02709
B_Tele	B_Dolok Sanggul	0,02895	0,07196	0,02394
B_Tanjung Pura	B_Binjai	0,00451	0,01381	0,03139
B_Paya Pasir	B_Belawan PLTU	0,00014	0,00579	0,00897
B_Tele	B_Pangururan	0,00490	0,01220	0,00819
B_Simangkok	B_Galang1_275	0,00476	0,02628	1,18145
B_G. Tua	B_Rantau Prapat	0,05672	0,14467	0,04986
B_Perbaungan	B_T. Tinggi	0,03088	0,07870	0,04710
B_Sei Kera	B_Denai	0,02463	0,01413	0,00522
B_P. Siantar	B_Tanah Jawa	0,00269	0,00866	0,03038
B_Sei Rotan	B_KIM	0,01236	0,05296	0,01958
B_Renun 1,2	B_Brastagi	0,03633	0,09258	0,03188
B_GITET Medan Timur	B_GITET Medan Barat	0,00061	0,00334	0,14067
B_Batu Gingging	B_GIS Listrik	0,00051	0,00280	0,01046
B_Selayang	B_Paya Geli	0,00036	0,00115	0,00405
B_PLTA Asahan 3	B_Simangkok	0,00113	0,02995	0,00198
B_Paya Geli	B_Glugur	0,00018	0,00281	0,07441
B_Rantau Prapat	B_Kota Pinang	0,01045	0,03369	0,11830
B_AEK Kanopan	B_Kisaran	0,00040	0,00130	0,00406
B_Parlilitan	B_Dolok Sanggul	0,00950	0,04572	0,01013
B_T. Morawa	B_Kualanamu	0,00249	0,00803	0,09819
B_Denai	B_T. Morawa	0,00801	0,02041	0,00703
B_Titi Kuning	B_Namurambe	0,00190	0,00711	0,02603
B_Tarutung	B_Sigundong	0,00842	0,02712	0,02961
B_Sidikalang	B_PLTP Sipoholon	0,00144	0,00366	0,00126
B_KIM II	B_Sei Rotan	0,01030	0,04414	0,01631

Tabel 3.1 Data saluran sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
B_Mabar	B_KIM	0,00362	0,01355	0,04857
B_Mabar	B_Paya Pasir	0,00153	0,00571	0,02048
B_Sumut	B_Perdagangan1	0,00027	0,00086	0,03403
B_Sumbagut	B_GITET Medan Timur	0,00046	0,00250	0,10550
B_Binjai	B_Paya Geli	0,00143	0,00781	0,02913
B_Tanjung Pura	B_P. Brandan	0,00451	0,01382	0,03139
B_GIS Listrik	B_Titi Kuning	0,00121	0,00453	0,04659
B_Mabar	B_GIS Listrik	0,00091	0,00343	0,07228
B_Panyabungan	B_Natal	0,00895	0,09173	0,03151
B_Galang	B_T. Morawa	0,00110	0,00610	0,08108
B_Sarulla	B_Batang Toru	0,00061	0,02149	0,02723
B_Sarulla	B_Simangkok	0,00294	0,05282	0,21293
B_Labuhan Bilik	B_Rantau Prapat	0,01240	0,04070	0,13200
B_Rantau Prapat	B_P. Sidempuan	0,04453	0,16038	0,11186
B_Sipan 1	B_Sipan 2	0,00080	0,01448	0,00493
B_Kisaran	B_Rantau Prapat	0,03633	0,13070	0,09103
B_T. Tinggi	B_K. Tanjung	0,01024	0,03300	0,11587
B_P. Brandan	B_Binjai	0,00091	0,02929	0,22076
B_Dolok Sanggul	B_Pakat	0,00627	0,06423	0,01418
B_Paya Geli	B_Helvetie	0,00153	0,00601	0,02197
B_Selayang	B_Namurambe	0,00036	0,00115	0,00405
B_AEK Kanopan	B_Rantau Prapat	0,00040	0,00130	0,00406
B_Percut	B_Pancing	0,00110	0,00610	0,06638
B_Tarutung	B_Tele	0,05846	0,14912	0,05140
B_Tarutung	B_Sibolga	0,00886	0,09085	0,03121
B_P. Siantar	B_G. Para	0,00430	0,01385	0,04860
B_KIM	B_KIM II	0,00206	0,00883	0,00326
B_Sei Kera	B_Teladan	0,00091	0,00343	0,01228
B_Sei Rotan	B_T. Tinggi	0,02219	0,09512	0,23967
B_Denai	B_Sei Rotan	0,00822	0,02094	0,06821
B_Belawan PLTU	B_Labuhan	0,00212	0,00540	0,00186
B_Dairi	B_Brastagi	0,05379	0,13718	0,04728
B_Galang	B_GITET Medan Timur	0,00061	0,00334	0,14067
B_Brastagi	B_Sidikalang	0,00459	0,01170	0,04032

Tabel 3.1 Data saluran sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
B_P. Susu	B_Binjai	0,00715	0,03916	0,14634
B_Labuhan	B_Lamhotma	0,00272	0,00692	0,00171
B_Belawan PTLGU	B_Se Rotan	0,00547	0,03292	0,74346
B_P Susu	B_GITET Medan Barat	0,00183	0,01000	0,42214
B_Simonggo	B_Parlilitan	0,00453	0,02434	0,00446
B_Wampu	B_Brastagi	0,00716	0,02308	0,08101
B_Binjai	B_Galang	0,00273	0,01498	0,63348
B_Natal	B_PLTP S Merapi	0,00179	0,03044	0,01014
B_Renun 1,2	B_Sidikalang	0,01817	0,04629	0,01593
B_Tarutung	B_Sidikalang	0,00458	0,01714	0,06143
B_Salak	B_Sidikalang	0,01140	0,02830	0,04122
B_Sidikalang	B_Dolok Sanggul	0,04521	0,11526	0,03971
B_Kuala	B_Binjai	0,00170	0,00560	0,01828
B_Panyabungan	B_PLTP S Merapi	0,00179	0,01836	0,00630
B_T. Tinggi	B_G. Para	0,00430	0,01385	0,09860
B_R Prapat	B_Perdagangan	0,00453	0,02492	1,05730
B_Negeri Dolok	B_Galang	0,00338	0,01850	0,06906
B_P. Sidempuan	B_New P. Sidempuan	0,00020	0,00120	0,00422
B_Sarulla	B_New P. Sidempuan	0,00210	0,03884	0,15140
B_G. Tua	B_P. Sidempuan	0,03511	0,08949	0,03081
B_Sarulla	B_R Prapat	0,00334	0,05988	0,23320
B_Porsea	B_Simangkok	0,00042	0,00632	0,00099
B_PLTP Sipoholon	B_Tarutung	0,00036	0,00115	0,00405
B_Porsea	B_P. Siantar	0,00965	0,03109	0,10918
B_Titi Kuning	B_Teladan	0,00076	0,00286	0,01046
B_Martabe	B_P. Sidempuan	0,01381	0,08410	0,02259
B_Titi Kuning	B_Se Rotan	0,00262	0,00983	0,07599
B_Kisaran	B_Tanjung Balai	0,00570	0,01410	0,02061
B_Kisaran	B_Perdagangan	0,02410	0,07930	0,02584
B_K. Tanjung	B_Kisaran	0,01024	0,03300	0,11587
B_Sipan 1	B_Sibolga	0,00563	0,01433	0,00493
B_Helvetie	B_Glugur	0,00153	0,00571	0,08048
B_Sibolga	B_Martabe	0,00630	0,06423	0,02048
B_Kualanamu	B_Perbaungan	0,00190	0,00630	0,02032

Tabel 3.1 Data saluran sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
B_Sipan 2	B_Sibolga	0,00563	0,01433	0,00493
B_Galang	B_Namurambe	0,00460	0,02420	0,08432
B_Sibolga	B_Labuhan Angin	0,00516	0,05286	0,01037
B_Sibolga	B_P. Sidempuan	0,01268	0,04084	0,04460
B_Sigundong	B_Sibolga	0,00420	0,02059	0,00693
B_Hasang 1	B_AEK Kanopan	0,00040	0,00130	0,00406
B_Titi Kuning	B_Brastagi	0,00937	0,03010	0,10947
B_Symbolon Samosir	B_Tarutung	0,00950	0,09356	0,01013
B_Pancing	B_Denai	0,00330	0,01413	0,76220
B_Sei Kera	B_Pancing	0,00330	0,01412	1,82200
B_Tarutung	B_Porsea	0,01104	0,03558	0,12497
B_Sibuhuan	B_G. Tua	0,01710	0,05630	0,18280
B_Pancing	B_KIM II	0,00205	0,01075	0,08320
B_Dolok Sanggul	B_Tarutung	0,05807	0,15388	0,02395
B_Belawan PTLGU	B_Binjai	0,00355	0,01936	0,02204
B_Percut	B_KIM	0,00020	0,00120	0,03509
B_Percut	B_Sei Rotan	0,00020	0,00120	0,08509
B_Sidikalang	B_Symbolon Samosir	0,00950	0,09356	0,01013
B_Paya Pasir	B_Paya Geli	0,00324	0,01215	0,01435
B_Tele	B_Sidikalang	0,02900	0,07390	0,02542
B_Sei Rotan	B_Perbaungan	0,03088	0,07870	0,02709
B_T. Morawa	B_Sei Rotan	0,00558	0,01421	0,18890
B_Batu Gingging	B_Paya Geli	0,00103	0,00561	0,00643
B_Belawan PLTU	B_Lamhotma	0,00431	0,01099	0,00378
B_Sumut	B_Belawan PLTU	0,00040	0,00130	0,07406
B_Brastagi	B_Kuta Cane	0,01223	0,06711	0,25145
B_Sumbagut 1,3,4	B_Percut	0,00020	0,00120	0,01528
B_Paya Pasir	B_Sei Rotan	0,03618	0,01356	0,14857
B_Paya Geli	B_Namurambe	0,01131	0,03342	0,03869
B_Batang Toru	B_P Sidempuan	0,00107	0,01621	0,02723
B_Paya Geli	B_Titi Kuning	0,00465	0,01741	0,06376
B_P. Brandan	B_P. Susu	0,00111	0,00332	0,02093

Tabel 3.2 memperlihatkan data pembebanan dan data pembangkitan dari sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV yang digunakan pada simulasi tugas akhir ini.

Tabel 3.2 Data beban dan pembangkitan sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV

Bus Name	Load		Generator		
	MW	MVAr	MW	Qmax MVAr	Qmin MVAr
B_AEK Kanopan	29,86	14,46	0	0	0
B_Batang Toru	0	0	510	336,9	0
B_Batu Ginging	233,78	113,32	0	0	0
B_Belawan PLTU	0	0	220	149,9	0
B_Belawan PTLGU	0	0	900	578,5	0
B_Binjai	95,49	46,25	0	0	0
B_Brastagi	59,83	28,98	10	7,5	0
B_Dairi	8,92	4,32	43,5	32,8	0
B_Denai	111,04	53,78	0	0	0
B_Dolok Sanggul	7,48	3,69	0	0	0
B_G. Para	19,72	9,55	0	0	0
B_G. Tua	17,66	6,62	0	0	0
B_Galang	15,57	7,54	0	0	0
B_GIS Listrik	160,31	77,64	0	0	0
B_Glugur	110,91	53,72	32,7	30,9	0
B_Hasang 1	0	0	40	30,8	0
B_Helvetie	168,65	81,68	0	0	0
B_K. Tanjung	53,11	25,72	90	59,3	0
B_KIM	244,44	118,39	0	0	0
B_KIM II	127,55	61,78	0	0	0
B_Kisaran	64,72	31,35	0	0	0
B_Kota Pinang	58,63	28,4	116	71,9	0
B_Kuala	34,74	16,83	0	0	0
B_Kualanamu	107,52	52,07	0	0	0
B_Labuhan	68,27	33,06	0	0	0
B_Labuhan Angin	10,54	7,2	230	162,3	0
B_Labuhan Bilik	21,51	10,42	0	0	0
B_Lamhotma	72,78	35,25	0	0	0

Tabel 3.2 Data beban dan pembangkitan sistem kelistrikan Sumut
150/275 kV (lanjutan)

Bus Name	Load		Generator		
	MW	MVAr	MW	Qmax MVAr	Qmin MVAr
B_Mabar	80,99	39,23	0	0	0
B_Martabe	6,99	3,39	0	0	0
B_Namurambe	101,29	49,06	0	0	0
B_Natal	7,03	3,4	0	0	0
B_Negeri Dolok	4,33	2,1	32,2	24,4	0
B_New P. Sidempuan	0	0	100	74,5	0
B_P. Brandan	63	30,51	0	0	0
B_P. Siantar	83,85	40,61	0	0	0
B_P. Sidempuan	69,63	33,72	0	0	0
B_P. Susu	0	0	840	597,5	0
B_Pakat	4,65	2,25	10	22,1	0
B_Pancing	176,42	85,44	0	0	0
B_Pangururan	9,12	4,42	0	0	0
B_Panyabungan	14,89	7,21	0	0	0
B_Parlilitan	10,47	7,23	51,4	38,9	0
B_Paya Geli	235,36	113,99	0	0	0
B_Paya Pasir	88,3	42,77	26,5	20,35	0
B_Perbaungan	52,28	25,32	0	0	0
B_Perdagangan	148,57	71,96	0	0	0
B_PLTA Asahan 3	0	0	174	129,1	0
B_PLTP S Merapi	0	0	240	162,4	0
B_Symbolon Samosir	0	0	110	83,5	0
B_PLTP Sipoholon	0	0	55	43,0	0
B_Porsea	14,79	7,16	0	0	0
B_Rantau Prapat	112	54,24	0	0	0
B_Renun 1,2	0	0	82	52,2	0
B_Salak	2,22	1,8	48	36,0	0
B_Sarulla	0	0	440	333,9	0
B_Sei Kera	131,29	63,59	0	0	0
B_Sei Rotan	133,28	64,55	0	0	0
B_Selayang	154,49	74,82	0	0	0

Tabel 3.2 Data beban dan pembangkitan sistem kelistrikan Sumut
150/275 kV (lanjutan)

Bus Name	Load		Generator		
	MW	MVAr	MW	Qmax MVAr	Qmin MVAr
B_Sibolga	44,14	21,38	0	0	0
B_Sibuhuan	21,46	10,39	0	0	0
B_Sidikalang	18,89	9,15	0	0	0
B_Sigundong	0	0	70	25,0	0
B_Simangkok	0	0	180	124,9	0
B_Simonggo	0	0	90	59,0	0
B_Sipan 1	0	0	33	24,8	0
B_Sipan 2	0	0	17	12,4	0
B_Sumbagut 1,3,4	0	0	750	423,2	0
B_Sumut	0	0	600	223,4	0
B_T. Morawa	112,07	54,28	0	0	0
B_T. Tinggi	92,19	44,65	0	0	0
B_Tanah Jawa	32,94	15,95	67,3	52,1	0
B_Tanjung Balai	89,54	43,37	0	0	0
B_Tanjung Pura	56,94	27,58	0	0	0
B_Tarutung	49,18	23,82	0	0	0
B_Teladan	234,22	113,44	0	0	0
B_Tele	1,08	0,52	0	0	0
B_Titi Kuning	158,3	76,67	24,84	15,4	0
B_Wampu	0	0	40	34,0	0

3.2 Identitas Bus pada Sistem Kelistrikan Sumut 150/275 kV

Pada sistem tenaga listrik dikenal 3 identitas bus yaitu *slack bus* (magnitud dan sudut tegangan ditentukan), *generator bus* (magnitud tegangan dan daya aktif P ditentukan) dan *load bus* (daya aktif P dan daya reaktif Q ditentukan). Bus – bus yang terdapat pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV memiliki identitas sebagai berikut :

1. *Slack bus* yaitu bus Belawan PLTGU yang merupakan pembangkit listrik tenaga gas uap dengan kapasitas pembangkit 900 MW.

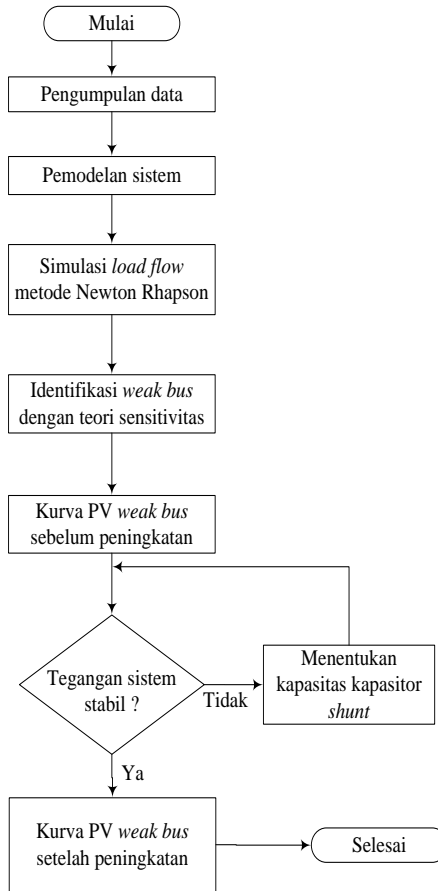
2. *Generator bus* yaitu bus Batang Toru, Belawan PLTU, Brastagi, Dairi, Glugur, Hasang 1, Kuala Tanjung, Kota Pinang, Labuhan Angin, Negeri Dolok, New Padang Sidempuan, Pangkalan Susu, Pakat, Parlilitan, Paya Pasir, PLTA Asahan 3, PLTP Sorik Merapi, PLTP Simbolon Samosir, PLTP Sipoholon Ria-Ria, Renun, Salak, Sarula, Sigundong, Simangkok, Simonggo, Sipan 1, Sipan 2, Sumbagut, Sumut, Tanah Jawa, Titi Kuning dan PLTA Wampu.
3. *Load bus* yaitu bus Aek Kanopan, Batu Gingging, Binjai, Denai, Dolok Sanggul, Gunung Para, Gunung Tua, Galang, GIS Listrik, Helvetie, Kim, Kim II, Kisaran, Kuala, Kualanamu, Labuhan, Labuhan Bilik, Lamhotma, Mabar, Martabe, Namurambe, Natal, Pangkalan Brandan, Pematang Siantar, Pancing, Pangururan, Panyabungan, Paya Geli, Perbaungan, Perdagangan, Porsea, Rantau Prapat, Sei Kera, Sei Rotan, Selayang, Sibolga, Sibuhuan, Sidikalang, Tanjung Morawa, Tebing Tinggi, Tanjung Balai, Tanjung Pura, Tarutung, Teladan dan Tele.

3.3 Metodologi Simulasi

Gambar 3.2 menggambarkan tentang tahapan-tahapan metodologi yang dilakukan dalam studi untuk mengidentifikasi *weak bus* dan meningkatkan stabilitas tegangan pada sistem kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV tahun 2024.

Tahapan-tahapan metodologi tersebut dijelaskan sebagai berikut :

1. Data sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV 2024, berupa data pembangkit, data saluran dan data beban bersumber dari RUPTL, PT. PLN dan tugas akhir mahasiswa Teknik Elektro ITS saudara Danar yang membahas tentang kestabilan transien sistem kelistrikan Sumut tahun 2020.
2. Pemodelan sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV 2024 dilakukan menggunakan *software* PowerWorld 19.
3. Simulasi *load flow* menggunakan metode Newton Rhapson juga dilakukan menggunakan fitur *Power Flow Tools* yang telah disediakan oleh *software* PowerWorld 19.



Gambar 3.2 Flowchart metodologi penelitian

4. Identifikasi *weak bus* pada sistem kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV 2024 dihasilkan dengan menggunakan teori sensitivitas. Teori sensitivitas ini menjelaskan drop tegangan pada suatu bus ketika terjadi penambahan beban. Dengan fasilitas fitur *sensitivities* yang tersedia pada *software PowerWorld*, bus terlemah pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV dapat ditemukan dengan melihat nilai indeks VP *sensitivities* terkecil [9].

5. Setelah mengetahui bus yang teridentifikasi lemah, selanjutnya mengevaluasi stabilitas tegangan dengan menganalisa kurva PV. Kurva PV diperoleh dengan cara melakukan penambahan beban pada bus dan menampilkan perubahan yang terjadi pada tegangan setelah ada penambahan beban tersebut.
6. Apabila tegangan sistem belum mencapai stabil, maka bus yang teridentifikasi lemah tersebut memerlukan kompensasi daya reaktif kapasitif agar profil tegangan menjadi meningkat. Penentuan kapasitas kompensasi daya reaktif kapasitif ini dilakukan dengan cara *incremental step*. Pemberian kompensasi ini akan meningkatkan faktor daya beban. Dengan meningkatkan faktor daya maka batas stabilitas tegangan dan daya yang mampu ditransfer akan meningkat.
7. Setelah dilakukan penambahan kompensasi daya reaktif kapasitif pada bus lemah, plot ulang kurva PV sehingga akan terlihat perbedaannya antara sebelum dan sesudah pemberian kompensasi daya reaktif kapasitif.
8. Dengan menganalisa stabilitas tegangan melalui kurva PV yang diperoleh setelah adanya penambahan kompensasi daya reaktif kapasitif pada bus lemah, maka profil tegangan akan menjadi stabil, kapasitas daya yang mampu ditransfer meningkat dan rugi-rugi saluran menjadi berkurang [10].

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini penulis menampilkan hasil simulasi yang telah dilakukan terhadap sistem kelistrikan Sumut 150 kV dan 275 kV dengan menggunakan *software PowerWorld Simulator 19*, kemudian menganalisisnya untuk mengidentifikasi *weak bus* dan meningkatkan *voltage stability*. Identifikasi bus lemah ditentukan berdasarkan nilai sensitivitas yang diperoleh dari *PowerWorld*, sedangkan peningkatan stabilitas tegangan dilakukan dengan memberikan kompensasi daya reaktif kapasitif oleh sebuah kapasitor *shunt* yang dipasang pada bus terlemah.

4.1 Sistem Kelistrikan Sumut 150/275 kV

Dalam menjalankan simulasi menggunakan *software PowerWorld*, memerlukan data sistem kelistrikan Sumut 150 kV dan 275 kV tahun 2024 yaitu berupa data saluran, data beban, data pembangkitan dan data *single line diagram* sebagaimana telah disajikan pada bab 3. Data tersebut menggambarkan bentuk perencanaan pemerintah dalam mengembangkan pembangunan kelistrikan di Sumatra Utara tahun 2024 yang didasarkan pada Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) yang dikeluarkan oleh pemerintah untuk periode 2016-2025. Pada tahun 2024, sistem kelistrikan Sumut 150kV dan 275 kV diramalkan beroperasi dengan total kapasitas pembangkitan sebesar 5.942,5 MW dan total beban puncak sebesar 4.519,2 MW dan 2.192 MVar.

Operasi sistem kelistrikan Sumut dikelola oleh PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatra Unit Pengatur Beban Sumatra Bagian Utara. Sampai saat ini, sistem penyaluran tenaga listrik di wilayah Sumatra Utara menggunakan kelas tegangan tinggi 150 kV dan 275 kV. Adapun jenis pembangkit yang menyuplai sistem kelistrikan yang ada di wilayah Sumut pun bermacam-macam, mulai dari jenis PLTU (terdiri dari bus Belawan, Labuhan Angin, Pangkalan Susu dan Sumut), PLTGU (terdiri dari bus Belawan dan Sumbagut), PLTA (terdiri dari bus Renun, Asahan, Sipan, Wampu, Hasang, Batang Toru, Sigundong dan Simonggo), PLTG (bus Paya Pasir), PLTD (bus Glugur) dan PLTP (terdiri dari bus Sarula, Sorik Merapi, Simbolon Samosir dan Sipoholon Ria-Ria).

4.2 Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya pada tugas akhir ini dilakukan dengan menggunakan metode Newton Raphson yang telah disediakan oleh *PowerWorld Simulator 19*. Dalam simulasi aliran daya ini, ditentukan MVA base 100 MVA dan kV base yaitu 150 kV dan 275 kV. Tujuan dilakukannya simulasi aliran daya adalah untuk mengetahui besaran-besaran listrik di setiap bus pada kondisi normal seperti magnitud tegangan, sudut tegangan, daya aktif dan daya reaktif. Hasil simulasi aliran daya yang diperoleh dari sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV 2024 diperlihatkan pada tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Hasil simulasi aliran daya Sumut 150/275 kV 2024

Bus Name	Volt		Load		Generation		Shunt MVA _r
	PU	Θ	MW	MVA _r	MW	MVA _r	
B_AEK Kanopan	0,98046	-2,7	29,86	14,46	-	-	-
B_Batang Toru	1	19,7	-	-	362,18	4,28	-
B_Batu Gingging	0,94924	-7,3	233,78	113,32	-	-	-
B_Belawan PLTU	0,99024	-4,0	-	-	182,13	149,88	-
B_Belawan PTLGU	1	0,0	-	-	699,47	104,9	-
B_Binjai	0,97198	-3,9	95,49	46,25	-	-	-
B_Brastagi	0,98675	-1,9	59,83	28,98	8,21	7,45	-
B_Dairi	1	-0,7	8,92	4,32	34,03	0,22	-
B_Denai	0,96275	-7,3	111,04	53,78	-	-	-
B_Dolok Sanggul	0,99879	0,4	7,48	3,69	-	-	-
B_G. Para	0,97047	-4,2	19,72	9,55	-	-	-
B_G. Tua	0,98255	2,1	17,66	6,62	-	-	-
B_Galang	0,97548	-5,7	15,57	7,54	-	-	47,58
B_GIS Listrik	0,95255	-7,2	160,31	77,64	-	-	-
B_Glugur	0,95017	-7,1	110,91	53,72	23,23	30,87	-
B_Hasang 1	0,98097	-2,6	-	-	23,01	30,81	-
B_Helvetie	0,94726	-7,3	168,65	81,68	-	-	-
B_K. Tanjung	0,98021	-4,2	53,11	25,72	53,04	59,25	-
B_KIM	0,96905	-6,6	244,44	118,39	-	-	-
B_KIM II	0,96369	-7,2	127,55	61,78	-	-	-
B_Kisaran	0,97959	-2,9	64,72	31,35	-	-	-
B_Kota Pinang	1	-1,8	58,63	28,4	106,53	64,11	-
B_Kuala	0,97044	-4,0	34,74	16,83	-	-	-

Tabel 4.1 Hasil simulasi aliran daya Sumut 150/275 kV 2024 (lanjutan)

Bus Name	Volt		Load		Generation		Shunt MVar
	PU	Ø	MW	MVar	MW	MVar	
B_Kualanamu	0,95883	-7,0	107,52	52,07	-	-	-
B_Labuhan	0,98605	-4,3	68,27	33,06	-	-	-
B_Labuhan Angin	1	9,5	10,54	7,2	156,09	4,04	-
B_Labuhan Bilik	0,97663	-2,9	21,51	10,42	-	-	-
B_Lamhotma	0,9849	-4,3	72,78	35,25	-	-	-
B_Mabar	0,96038	-6,8	80,99	39,23	-	-	-
B_Martabe	0,99683	5,8	6,99	3,39	-	-	-
B_Namurambe	0,95177	-7,0	101,29	49,06	-	-	-
B_Natal	0,99881	16,6	7,03	3,4	-	-	-
B_Negeri Dolok	0,98094	-5,5	4,33	2,1	22,73	24,37	-
B_New P. Sidempuan	1	7,1	-	-	90,53	30	-
B_P. Brandan	0,9914	-1,2	63	30,51	-	-	-
B_P. Siantar	0,97516	-3,2	83,85	40,61	-	-	-
B_P. Sidempuan	0,99943	7,0	69,63	33,72	-	-	-
B_P. Susu	1	-0,5	-	-	692,17	172,44	-
B_Pakat	1	0,5	4,65	2,25	8,21	3,13	-
B_Pancing	0,96551	-7,3	176,42	85,44	-	-	-
B_Pangururan	0,99517	0,0	9,12	4,42	-	-	-
B_Panyabungan	0,99692	15,3	14,89	7,21	-	-	-
B_Parlilitan	1	0,8	10,47	7,23	27,57	6,43	-
B_Paya Geli	0,95196	-6,9	235,36	113,99	-	-	-
B_Paya Pasir	0,9732	-5,9	88,3	42,77	17,03	20,35	-
B_Perbaungan	0,95778	-7,0	52,28	25,32	-	-	-
B_Perdagangan	0,97682	-4,8	148,57	71,96	-	-	-
B_PLTA Asahan 3	1	10,1	-	-	137,04	2,44	-
B_PLTP S Merapi	1	17,1	-	-	203,04	4,1	-
B_PLTP Sipoholon	0,99733	0,4	-	-	29,01	43,04	-
B_Porsea	0,99493	0,6	14,79	7,16	-	-	-
B_Rantau Prapat	0,98115	-2,5	112	54,24	-	-	-
B_Renun 1,2	1	-0,2	-	-	31,53	9,36	-
B_Salak	1	0,6	2,22	1,8	38,53	0,58	-
B_Sarulla	1	16,0	-	-	292,34	36,16	-
B_Sei Kera	0,9533	-7,7	131,29	63,59	-	-	-

Tabel 4.1 Hasil simulasi aliran daya Sumut 150/275 kV 2024 (lanjutan)

Bus Name	Volt		Load		Generation		Shunt
	PU	Ø	MW	MVAr	MW	MVAr	MVAr
B_Sei Rotan	0,97019	-6,4	133,28	64,55	-	-	-
B_Selayang	0,95111	-7,0	154,49	74,82	-	-	-
B_Sibolga	0,99784	5,1	44,14	21,38	-	-	-
B_Sibuhuan	0,97772	1,4	21,46	10,39	-	-	-
B_Sidikalang	0,99568	0,0	18,89	9,15	-	-	-
B_Sigundong	1	3,4	-	-	35,01	0,72	-
B_Simangkok	1	7,7	-	-	53,04	7,42	-
B_Sipan 1	1	5,2	-	-	20,21	7,73	-
B_Sipan 2	1	5,2	-	-	11,31	9,13	-
B_Sumbagut 1,3,4	0,97906	-6,0	-	-	646,38	423,18	-
B_Sumut	0,99495	-3,7	-	-	526,09	223,4	-
B_T. Morawa	0,96697	-6,6	112,07	54,28	-	-	-
B_T. Tinggi	0,96732	-5,1	92,19	44,65	-	-	-
B_Tanah Jawa	0,97847	-3,2	32,94	15,95	33,93	52,06	-
B_Tanjung Balai	0,97492	-3,6	89,54	43,37	-	-	47,52
B_Tanjung Pura	0,97833	-2,8	56,94	27,58	-	-	-
B_Tarutung	0,99709	0,5	49,18	23,82	-	-	-
B_Teladan	0,9505	-7,5	234,22	113,44	-	-	-
B_Tele	0,99616	0,1	1,08	0,52	-	-	-
B_Titi Kuning	0,95353	-7,1	158,3	76,67	15,37	15,4	-
B_Wampu	0,99774	-0,2	-	-	30,53	34,03	-

Dari hasil simulasi aliran daya diatas, juga diperoleh besar rugi – rugi daya yang terjadi pada sistem transmisi Sumut 150/275 kV sebagaimana diperlihatkan pada tabel 4.2 dibawah ini.

Tabel 4.2 Rugi-rugi daya pada transmisi Sumut 150/275 kV

Dari Bus	Ke Bus	MW Loss
B_K. Tanjung	B_Perdagangan	0,04
B_Kuta Cane	B_Dairi	0,06
B_Panyabungan	B_P. Sidempuan	2,53
B_Tele	B_Dolok Sanggul	0,02
B_Tanjung Pura	B_Binjai	0,94

Tabel 4.2 Rugi-rugi daya pada transmisi Sumut 150/275 kV (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	MW Loss
B_Paya Pasir	B_Belawan PLTU	0,54
B_Tele	B_Pangururan	0,01
B_Simangkok	B_Galang_275	2,62
B_G. Tua	B_Rantau Prapat	1,44
B_Perbaungan	B_T. Tinggi	0,48
B_Sei Kera	B_Denai	0,36
B_P. Siantar	B_Tanah Jawa	0,04
B_Sei Rotan	B_KIM	0,01
B_Renun 1,2	B_Brastagi	0,39
B_GITET MT	B_GITET MB	0,09
B_Batu Gingging	B_GIS Listrik	0,11
B_Selayang	B_Paya Geli	0,1
B_PLTA Asahan 3	B_Simangkok	0,21
B_Paya Geli	B_Glugur	0,04
B_Rantau Prapat	B_Kota Pinang	0,42
B_AEK Kanopan	B_Kisaran	0,26
B_Parlilitan	B_Dolok Sanggul	0,03
B_T. Morawa	B_Kualanamu	0,42
B_Denai	B_T. Morawa	0,31
B_Titi Kuning	B_Namurambe	0,01
B_Tarutung	B_Sigundong	2,63
B_Sidikalang	B_PLTP Sipoholon	0,5
B_KIM II	B_Sei Rotan	0,1
B_Mabar	B_KIM	0,14
B_Mabar	B_Paya Pasir	1,67
B_Binjai	B_Paya Geli	6,42
B_Tanjung Pura	B_P. Brandan	1,88
B_GIS Listrik	B_Titi Kuning	0,02
B_Mabar	B_GIS Listrik	0,79
B_Panyabungan	B_Natal	0,05
B_Galang	B_T. Morawa	0,85
B_Sarulla	B_Batang Toru	0,53
B_Sarulla	B_Simangkok	2,2

Tabel 4.2 Rugi-rugi daya pada transmisi Sumut 150/275 kV (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	MW Loss
B_Labuhan Bilik	B_Rantau Prapat	0,06
B_Rantau Prapat	B_P. Sidempuan	4,36
B_Kisaran	B_Rantau Prapat	0,01
B_T. Tinggi	B_K. Tanjung	0,33
B_P. Brandan	B_Binjai	0,27
B_Paya Geli	B_Helvetie	0,26
B_Selayang	B_Namurambe	0,01
B_AEK Kanopan	B_Rantau Prapat	0,28
B_Percut	B_Pancing	0,74
B_Tarutung	B_Tele	0,01
B_Tarutung	B_Sibolga	0,68
B_P. Siantar	B_G. Para	0,67
B_KIM	B_KIM II	0,28
B_Sei Kera	B_Teladan	0,09
B_Sei Rotan	B_T. Tinggi	0,12
B_Denai	B_Sei Rotan	0,49
B_Belawan PLTU	B_Labuhan	0,2
B_Dairi	B_Brastagi	0,16
B_Galang_275	B_GITET MT	0,07
B_Brastagi	B_Sidikalang	3,15
B_P. Susu	B_Binjai	1,95
B_Labuhan	B_Lamhotma	0,01
B_Belawan PTLGU	B_Sei Rotan	6,4
B_P Susu_275	B_GITET MB	0,24
B_Wampu	B_Brastagi	0,17
B_Binjai_275	B_Galang_275	0,06
B_Natal	B_PLTP S Merapi	0,02
B_Renun 1,2	B_Sidikalang	0,02
B_Tarutung	B_Sidikalang	0,13
B_Salak	B_Sidikalang	0,15
B_Sidikalang	B_Dolok Sanggul	0,02
B_Kuala	B_Binjai	0,03
B_Panyabungan	B_PLTP S Merapi	0,53

Tabel 4.2 Rugi-rugi daya pada transmisi Sumut 150/275 kV (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	MW Loss
B_T. Tinggi	B_G. Para	0,47
B_R Prapat_275	B_Perdagangan_275	0,32
B_Negeri Dolok	B_Galang	0,03
B_P. Sidempuan	B_New P. Sidempuan	0,03
B_Sarulla	B_N P Sidempuan_275	0,01
B_G. Tua	B_P. Sidempuan	2,84
B_Sarulla	B_R Prapat_275	2,89
B_Porsea	B_Simangkok_150	0,22
B_PLTP Sipoholon	B_Tarutung	0,1
B_Porsea	B_P. Siantar	4,26
B_Titi Kuning	B_Teladan	0,61
B_Martabe	B_P. Sidempuan	0,09
B_Titi Kuning	B_Se Rotan	1,01
B_Kisaran	B_Tanjung Balai	0,48
B_Kisaran	B_Perdagangan	0,38
B_K. Tanjung	B_Kisaran	0,47
B_Sipan 1	B_Sibolga	0,02
B_Helvetie	B_Glugur	0,07
B_Sibolga	B_Martabe	0,02
B_Kualanamu	B_Perbaungan	0,01
B_Sipan 2	B_Sibolga	0,02
B_Galang	B_Namurambe	0,79
B_Sibolga	B_Labuhan Angin	1,09
B_Sibolga	B_P. Sidempuan	0,79
B_Sigundong	B_Sibolga	0,87
B_Hasang 1	B_AEK Kanopan	0,01
B_Titi Kuning	B_Brastagi	8,32
B_Pancing	B_Denai	0,02
B_Se Kera	B_Pancing	0,31
B_Tarutung	B_Porsea	0,01
B_Sibuhuan	B_G. Tua	0,09
B_Pancing	B_KIM II	0,01
B_Belawan PTLGU	B_Binjai	4,91

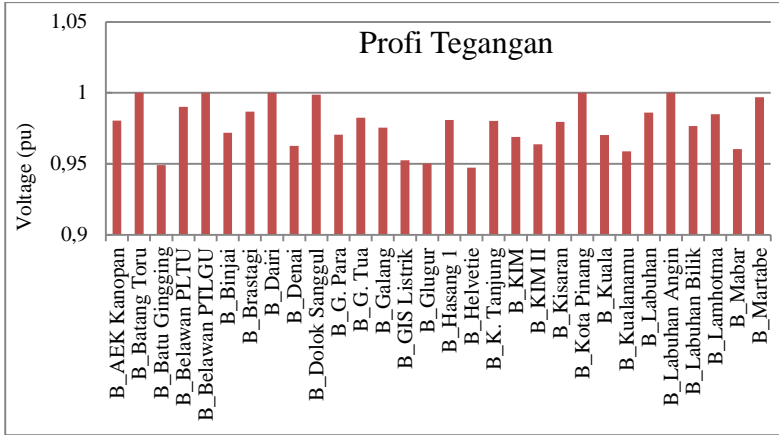
Tabel 4.2 Rugi-rugi daya pada transmisi Sumut 150/275 kV (lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	MW Loss
B_Percut	B_KIM	0,38
B_Percut	B_Se Rotan	0,07
B_Paya Pasir	B_Paya Geli	1,51
B_Se Rotan	B_Perbaungan	0,11
B_T. Morawa	B_Se Rotan	0,04
B_Batu Gingging	B_Paya Geli	0,19
B_Belawan PLTU	B_Lamhotma	0,16
B_Sumut	B_Belawan PLTU	1,2
B_Brastagi	B_Kuta Cane	0,04
B_Sumbagut 1,3,4	B_Percut	1,35
B_Paya Pasir	B_Se Rotan	0,23
B_Batang Toru	B_P Sidempuan_275	0,05
B_Paya Geli	B_Titi Kuning	0,02
B_P. Brandan	B_P. Susu	2,16
Total		90,3

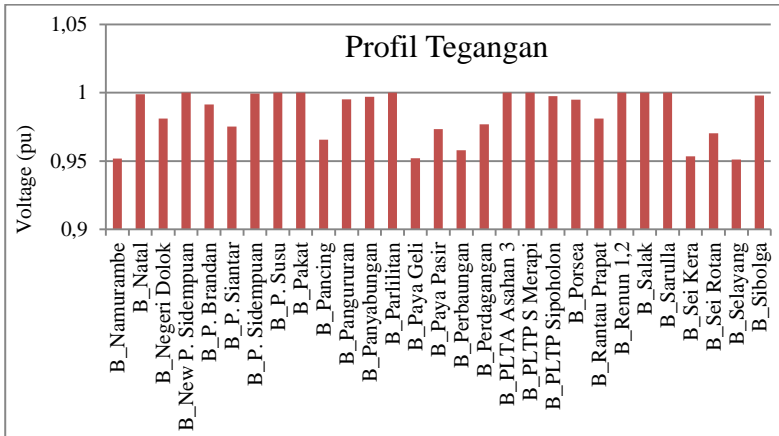
Menurut hasil simulasi *load flow* sebagaimana diperlihatkan pada tabel 4.1 diatas, dapat diketahui bahwa, dalam kondisi beban normal sebelum dilakukan peningkatan stabilitas tegangan terdapat 2 bus dalam kondisi tidak normal yaitu bus Batu Gingging dan bus Helvetie.

Sesuai standar tegangan PLN untuk transmisi tegangan tinggi 150 kV dan 275 kV, tegangan bus dikatakan tidak normal apabila melebihi range $\pm 5\%$ atau ($0,95 \text{ pu} > V > 1,05 \text{ pu}$). Dimana diketahui tegangan pada bus Batu Gingging adalah sebesar 0,94924 pu dan pada bus Helvetie adalah sebesar 0,94726 pu. Sedangkan total rugi – rugi daya pada transmisi Sumut 150 kV dan 275 kV sebagaimana diperlihatkan pada tabel 4.2 diketahui sebesar 90,3 MW.

Selanjutnya ditampilkan profil tegangan bus sistem kelistrikan Sumatra Utara 150 kV dan 275 kV dalam bentuk grafik, hal ini untuk memudahkan secara visual dalam mengetahui tegangan bus yang mengalami *under voltage* dan kritis.

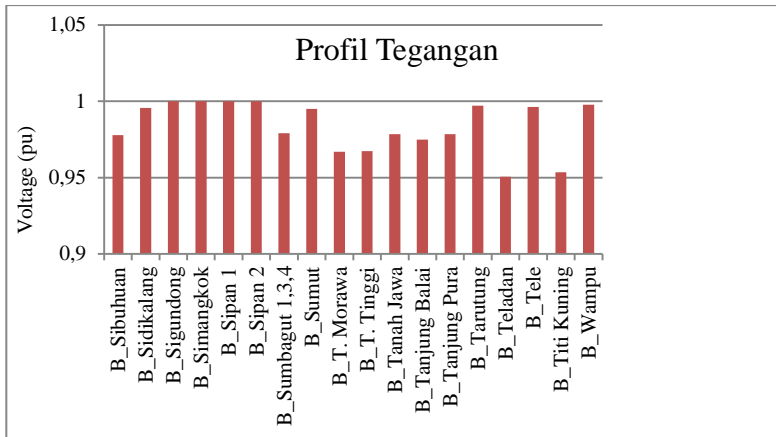


(a)



(b)

Gambar 4.1 Grafik profil tegangan bus sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV (a) bus Aek Kanopan-bus Martabe, (b) bus Namurambe-bus Sibolga



(c)

Gambar 4.1 Grafik profil tegangan bus sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV (c) bus Sibuhuan-bus Wampu

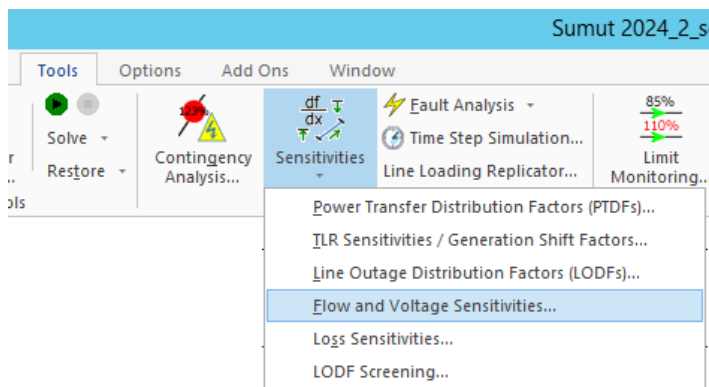
Selain terdapat 2 bus yang mengalami *undervoltage*, pada sistem kelistrikan Sumut juga terdapat beberapa tegangan bus yang berada pada batas kritis diantaranya adalah bus GIS Listrik, Glugur, Namurambe, Paya Geli, Sei Kera, Selayang, Teladan dan Titi Kuning.

4.3 Analisis Penentuan *Weak Bus*

Dalam menentukan *weak bus* pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV diperoleh dengan menggunakan teori sensitivitas tegangan. Teori ini menjelaskan tentang keadaan tegangan pada bus apabila dilakukan penambahan beban, atau pada keadaan normal dilakukan aliran daya, kondisi beban pada bus beban tidak mengalami penurunan [9]. Penurunan tegangan pada bus beban akan terjadi, apabila pada bus beban dilakukan penambahan beban. Dengan kata lain, dalam sistem tenaga listrik, *weak bus* dapat juga diartikan sebagai bus yang sensitiv terhadap perubahan beban, apabila bus mendapatkan penambahan beban, maka drop tegangan tinggi akan terjadi pada *weak bus* tersebut.

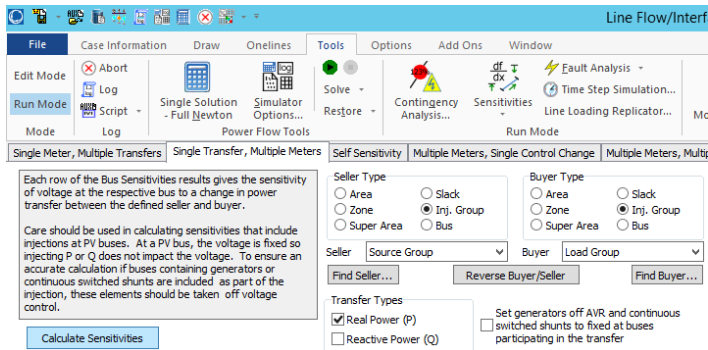
Berdasarkan perhitungan sensitivitas yang dilakukan pada *PowerWorld*, diperoleh nilai sensitivitas bus sebagaimana diperlihatkan pada tabel 4.3. Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan nilai sensitivitas tersebut adalah sebagai berikut.

1. Pilih tab *Tools* kemudian pilih menu *Sensitivities* selanjutnya pilih *Flow and Voltage Sensitivities* sebagaimana diperlihatkan oleh gambar 4.2. Menu ini bisa diakses pada saat *run mode*. Menu *Flow and Voltage Sensitivities* ini berfungsi untuk menghitung sensitivitas tegangan terhadap berbagai transfer aliran daya pada sistem.



Gambar 4.2 *Sensitivites menu*

2. Kemudian akan muncul kotak dialog seperti yang diperlihatkan oleh gambar 4.3. Pada kotak dialog ini pilih tab *Single Transfer*, *Multiple Meters*. Fungsi *Single Transfer*, *Multiple Meters* ini menunjukkan pengaruh dari *single transfer* dari daya aktif atau reaktif terhadap semua tegangan bus pada sistem. Pada kotak dialog *Seller Type* pilih *Inj. Group Source Group* (total sumber yang berada pada area sistem) dan pada kotak dialog *Buyer Type* pilih *Inj. Group Load Group* (total beban yang berada pada area sistem). Setelah itu lakukan perhitungan dengan mengklik kotak dialog *Calculate Sensitivities*.



Gambar 4.3 Kotak dialog *Flow and Voltage Sensitivities*

Indeks sensitivitas yang dihitung adalah sensitivitas VP. Indeks sensitivitas VP ini diperoleh dengan cara melakukan pengujian penambahan beban aktif secara proporsional pada semua bus beban sampai pembebanan maksimum. Setelah dilakukan penambahan beban tersebut maka pada bus beban akan terjadi penurunan tegangan. Rasio perubahan tegangan suatu bus setelah adanya penambahan beban (dV_i) terhadap total perubahan beban aktif (dP_{total}) menghasilkan indeks sensitivitas tegangan sebagaimana dinyatakan oleh persamaan $2.77 \frac{dV_i}{dP_{total}}$ (per unit/MW).

- Hasil perhitungan sensitivitas VP yang diperoleh *PowerWorld* diperlihatkan oleh gambar 4.4.

Bus Sensitivities (ignore Area/Zone/Owner filter)

	Number	Name	Area Num	Area Name	VP Sensitivity ▲
1	76	L_Sei Kera	1 1		-0,00001809
2	75	B_Sei Kera	1 1		-0,00001800
3	214	L_Teladan	1 1		-0,00001779
4	41	B_Teladan	1 1		-0,00001770
5	157	L_Denai	1 1		-0,00001755
6	161	L_Perbaungan	1 1		-0,00001749
7	83	B_Denai	1 1		-0,00001748
8	73	L_Pancing	1 1		-0,00001747
9	86	B_Perbaungan	1 1		-0,00001743
10	72	B_Pancing	1 1		-0,00001739

Gambar 4.4 Hasil *Calculate Sensitivities*

Tabel 4.3 5 Bus terlemah sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV 2024

No	Nama Bus	VP Sensitivity
1	B_Sei Kera	-0,00001800
2	B_Teladan	-0,00001770
3	B_Denai	-0,00001749
4	B_Perbaungan	-0,00001743
5	B_Pancing	-0,00001739

Nilai-nilai sensitivitas yang terdapat pada tabel 4.3 diatas merupakan nilai sensitivitas tegangan terhadap perubahan transfer daya aktif pada bus. Nilai sensitivitas VP terkecil merupakan bus terlemah pada sistem, atau dengan kata lain bus yang paling sensitiv terhadap perubahan tegangan apabila dilakukan penambahan beban, dalam hal ini penambahan beban daya aktif. Dengan meranking nilai sensitivitas dari nilai terkecil hingga terbesar, diketahui bahwa bus terlemah pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV adalah bus Sei Kera, kemudian diikuti bus Teladan, Denai, Perbaungan dan Pancing.

Tingkat sensitivitas VP pada bus sistem memiliki hubungan dengan drop tegangan pada bus apabila dilakukan penambahan beban daya aktif. Untuk mengetahui drop tegangan setelah adanya penambahan beban, dalam tugas akhir ini, sistem diuji dengan memberikan penambahan beban sebesar 10%. Berikut drop tegangan (ΔV) yang dihasilkan pada setiap bus setelah adanya penambahan beban.

Tabel 4.4 Drop tegangan bus setelah penambahan beban

Bus	V_1 (pu)	V_{10} (pu)	ΔV (pu)
B_AEK Kanopan	0,98046	0,97447	0,00599
B_Batang Toru	1	1	0
B_Batu Gingging	0,94924	0,94261	0,00663
B_Belawan PLTU	0,99024	0,98429	0,00595
B_Belawan PTLGU	1	1	0
B_Binjai	0,97198	0,96847	0,00351
B_Brastagi	0,98675	0,98351	0,00324
B_Dairi	1	1	0
B_Denai	0,96275	0,95596	0,00679
B_Dolok Sanggul	0,99879	0,99845	0,00034

Tabel 4.4 Drop tegangan bus setelah penambahan beban (lanjutan)

Bus	V_i (pu)	V₁₀ (pu)	ΔV (pu)
B_G. Para	0,97047	0,9645	0,00597
B_G. Tua	0,98255	0,9796	0,00295
B_Galang	0,97548	0,96954	0,00594
B_GIS Listrik	0,95255	0,94586	0,00669
B_Glugur	0,95017	0,94398	0,00619
B_Hasang 1	0,98097	0,97501	0,00596
B_Helvetie	0,94726	0,9409	0,00636
B_K. Tanjung	0,98021	0,97406	0,00615
B_KIM	0,96905	0,96239	0,00666
B_KIM II	0,96369	0,95673	0,00696
B_Kisaran	0,97959	0,97351	0,00608
B_Kota Pinang	1	0,99753	0,00247
B_Kuala	0,97044	0,96686	0,00358
B_Kualanamu	0,95883	0,95188	0,00695
B_Labuhan	0,98605	0,97987	0,00618
B_Labuhan Angin	1	1	0
B_Labuhan Bilik	0,97663	0,97037	0,00626
B_Lamhotma	0,9849	0,97867	0,00623
B_Mabar	0,96038	0,95388	0,0065
B_Martabe	0,99683	0,99655	0,00028
B_Namurambe	0,95177	0,94541	0,00636
B_Natal	0,99881	0,99873	0,00008
B_Negeri Dolok	0,98094	0,97528	0,00566
B_New P. Sidempuan	1	1	0
B_P. Brandan	0,9914	0,99058	0,00082
B_P. Siantar	0,97516	0,97001	0,00515
B_P. Sidempuan	0,99943	0,9993	0,00013
B_P. Susu	1	1	0
B_Pakat	1	1	0
B_Pancing	0,96551	0,95855	0,00696
B_Pangururan	0,99517	0,99391	0,00126
B_Panyabungan	0,99692	0,99673	0,00019
B_Parlilitan	1	1	0
B_Paya Geli	0,95196	0,9458	0,00616

Tabel 4.4 Drop tegangan bus setelah penambahan beban (lanjutan)

Bus	V₁ (pu)	V₁₀ (pu)	ΔV (pu)
B_Paya Pasir	0,9732	0,96729	0,00591
B_Perbaungan	0,95778	0,95073	0,00705
B_Perdagangan	0,97682	0,96986	0,00696
B_PLTA Asahan 3	1	1	0
B_PLTP S Merapi	1	1	0
B_PLTP Sipoholon	0,99733	0,99591	0,00142
B_Porsea	0,99493	0,99242	0,00251
B_Rantau Prapat	0,98115	0,97525	0,0059
B_Renun 1,2	1	1	0
B_Salak	1	1	0
B_Sarulla	1	1	0
B_Sei Kera	0,9533	0,94608	0,00722
B_Sei Rotan	0,97019	0,96368	0,00651
B_Selayang	0,95111	0,94482	0,00629
B_Sibolga	0,99784	0,99753	0,00031
B_Sibuhuan	0,97772	0,97431	0,00341
B_Sidikalang	0,99568	0,99409	0,00159
B_Sigundong	1	1	0
B_Simangkok	1	1	0
B_Sipan 1	1	1	0
B_Sipan 2	1	1	0
B_Sumbagut 1,3,4	0,97906	0,97262	0,00644
B_Sumut	0,99495	0,98911	0,00584
B_T. Morawa	0,96697	0,96049	0,00648
B_T. Tinggi	0,96732	0,96075	0,00657
B_Tanah Jawa	0,97847	0,97355	0,00492
B_Tanjung Balai	0,97492	0,96835	0,00657
B_Tanjung Pura	0,97833	0,976	0,00233
B_Tarutung	0,99709	0,99566	0,00143
B_Teladan	0,9505	0,94342	0,00708
B_Tele	0,99616	0,99495	0,00121
B_Titi Kuning	0,95353	0,94683	0,00670
B_Wampu	0,99774	0,99507	0,00267

Setelah sistem diuji dengan penambahan beban, maka berdasarkan tabel 4.4 diatas dapat diketahui, bahwa bus yang memiliki drop tegangan melebihi standar, artinya tegangan bus menjadi *undervoltage* setelah adanya penambahan beban, terdapat 10 bus.

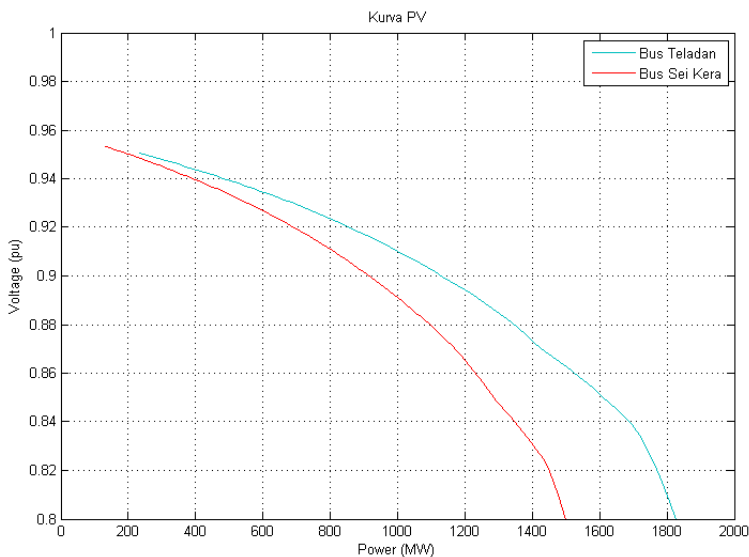
Tabel 4.5 Bus *undervoltage* setelah penambahan beban

Bus	$V_1(\text{pu})$	$V_{10}(\text{pu})$	ΔV
B_Sei Kera	0,95330	0,94608	0,00722
B_Teladan	0,95050	0,94342	0,00708
B_Titi Kuning	0,95353	0,94683	0,00670
B_GIS Listrik	0,95255	0,94586	0,00669
B_Batu Gingging	0,94924	0,94261	0,00663
B_Helvetie	0,94726	0,94090	0,00636
B_Namurambe	0,95177	0,94541	0,00636
B_Selayang	0,95111	0,94482	0,00629
B_Glugur	0,95017	0,94398	0,00619
B_Paya Geli	0,95196	0,94580	0,00616

Bus-bus diatas, pada beban normal sudah berada dalam kondisi kritis, sehingga ketika terjadi penambahan beban, bus-bus tersebut menjadi *undervoltage*. Dengan pendekatan penambahan beban pada sistem, apabila meranking drop tegangan kedua terbesar, maka drop tegangan tersebut terjadi pada bus Sei Kera dan bus Teladan. Hal ini sama dengan dua bus terlemah yang dihasilkan dengan melihat indeks sensitivitas. Seperti dijelaskan sebelumnya, bahwa nilai sensitivitas tegangan yang diperoleh dari *PowerWorld* terdapat kaitannya dengan drop tegangan, semakin besar drop tegangan pada bus maka semakin besar tingkat sensitivitas bus tersebut.

4.4 Plot Kurva PV

Kurva PV merupakan suatu kurva yang merepresentasikan hubungan antara daya P dengan tegangan V. Pada pembahasan ini, kurva PV diperoleh dengan cara melakukan penambahan beban P secara kontinyu pada bus tertentu hingga mencapai daya maksimum atau mencapai *blackout*. Pada percobaan ini, plot kurva PV dilakukan untuk 2 bus terlemah atau sensitiv sehingga kita dapat melihat perbandingan karakteristik diantara kedua bus terlemah tersebut. Kurva PV dua bus terlemah yaitu bus Sei Kera dan bus teladan diperlihatkan pada gambar 4.5 di bawah.



Gambar 4.5 Kurva PV 2 bus terlemah

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa hubungan antara perubahan daya P terhadap tegangan bus tidak linier, hubungan daya P berbanding terbalik dengan tegangan, semakin meningkat daya P pada bus maka tegangan bus pun menjadi semakin menurun. Dari kurva PV kedua bus diatas, diketahui karakteristik bus Sei Kera memiliki penurunan tegangan lebih cepat ketika ada penambahan daya P dibandingkan dengan bus Teladan. Daya pada bus Sei Kera sebesar 131,29 MW berada pada tegangan 0,9533 pu sedangkan daya pada bus Teladan sebesar 234,22 MW berada pada tegangan 0,9505 pu. Nilai tegangan pada kedua bus tersebut sangat mendekati batas minimal stabilitas tegangan sehingga perlu adanya peningkatan batas stabilitas tersebut.

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya beban normal, pada sistem terdapat dua bus yang mengalami *undervoltage* dan ketika sistem diuji dengan penambahan beban P dengan kenaikan 10%, terdapat sepuluh bus yang mengalami *undervoltage*. Hal ini menunjukkan kondisi sistem yang belum stabil. Oleh karena itu perlu dilakukan perbaikan stabilitas tegangan untuk dua bus *undervoltage* ketika operasi normal dan perlu peningkatan batas stabilitas tegangan untuk sepuluh bus yang mengalami kritis, agar ketika sistem menerima penambahan beban

(dalam hal ini maksimum 10%) tegangan sistem tetap terjaga pada batas yang diijinkan.

4.5 Analisa Peningkatan Stabilitas Tegangan

Analisa stabilitas tegangan membahas tentang bagaimana kemampuan sistem dalam menjaga tegangannya agar tetap berada pada batas yang diijinkan baik dalam kondisi *steady state* maupun pada saat ada penambahan beban. Oleh karena itu, dengan melihat hasil *load flow* dari sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV yang dapat dilihat pada tabel 4.1, maka perlu adanya upaya perbaikan serta peningkatan stabilitas tegangan pada bus yang mengalami *undervoltage* dan yang berada pada batas kritis. Pada tugas akhir ini, solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan memberikan kompensasi daya reaktif dengan menggunakan kapasitor *shunt*.

Tujuan pemasangan kapasitor adalah untuk memperbaiki profil tegangan yang mengalami *undervoltage* dan meningkatkan batas stabilitas tegangan apabila sewaktu-waktu sistem mendapat penambahan beban. Bus-bus yang mengalami kekurangan daya reaktif akan mendapat suplai daya reaktif dari kapasitor, dengan tambahan suplai daya reaktif ini arus saluran menjadi berkurang sehingga jatuh tegangan pada saluranpun berkurang dan mengakibatkan tegangan bus menjadi meningkat.

Pemasangan kapasitor ditempatkan pada bus terlemah yang diperoleh berdasarkan nilai sensitivitas bus sebagaimana dapat dilihat pada tabel 4.3. Pada percobaan ini pemasangan kapasitor ditempatkan pada satu bus terlemah yaitu bus Sei Kera. Pemberian injeksi daya reaktif dengan kapasitor ini difokuskan untuk memperbaiki dan meningkatkan profil tegangan pada sepuluh bus sebagaimana tertera pada tabel 4.5.

Dalam menentukan kapasitas kapasitor yang akan dipasang pada bus Sei Kera, penulis memperoleh nilai kapasitas tersebut dengan melakukan *incremental step* dengan range 0 – 300 MVar dengan kenaikan 25 MVar. *Incremental step* ini berhenti sampai nilai tegangan pada 10 bus sebagaimana pada tabel 4.5 mampu menjaga drop tegangan (ΔV) sehingga profil tegangan masih berada pada batas yang diijinkan.

Tabel 4.6 Injek MVar pada bus Sei Kera untuk meningkatkan profil tegangan

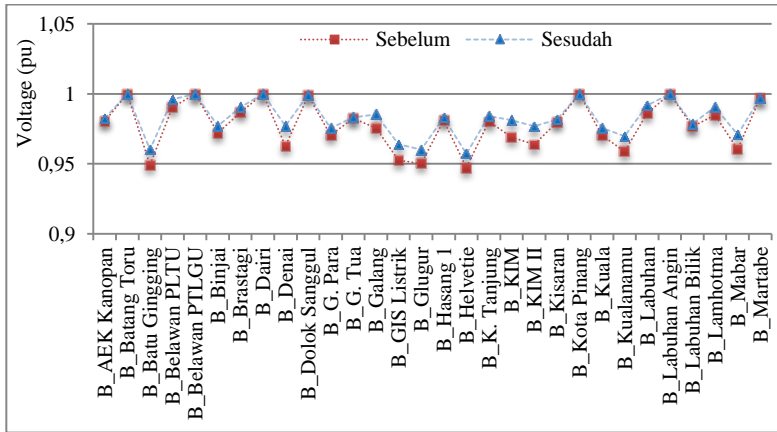
No	Bus	Injek VAR (MVar) Bus Sei Kera								
		V1 (pu)	Nominal	Actual	Nominal	Actual	Nominal	Actual	Nominal	Actual
			25	22,9	50	46	75	69,5	100	93,1
			V (pu)		V (pu)		V (pu)		V (pu)	
1	B_Sei Kera	0,95330	0,95632		0,95935		0,96239		0,96483	
2	B_Teladan	0,95050	0,95298		0,95548		0,95799		0,95989	
3	B_GIS Listrik	0,95255	0,95442		0,95631		0,95820		0,95941	
4	B_Titi Kuning	0,95353	0,95556		0,95760		0,95965		0,96108	
5	B_Batu Ginging	0,94924	0,95104		0,95286		0,95468		0,95584	
6	B_Namurambe	0,95177	0,95349		0,95523		0,95697		0,95811	
7	B_Helvetie	0,94726	0,94891		0,95057		0,95224		0,95330	
8	B_Selayang	0,95111	0,95280		0,95450		0,95620		0,95730	
9	B_Glugur	0,95017	0,95182		0,95348		0,95514		0,95620	
10	B_Paya Geli	0,95196	0,95361		0,95526		0,95692		0,95798	

Tabel 4.6 Injek MVar pada bus Sei Kera untuk meningkatkan profil tegangan (lanjutan)

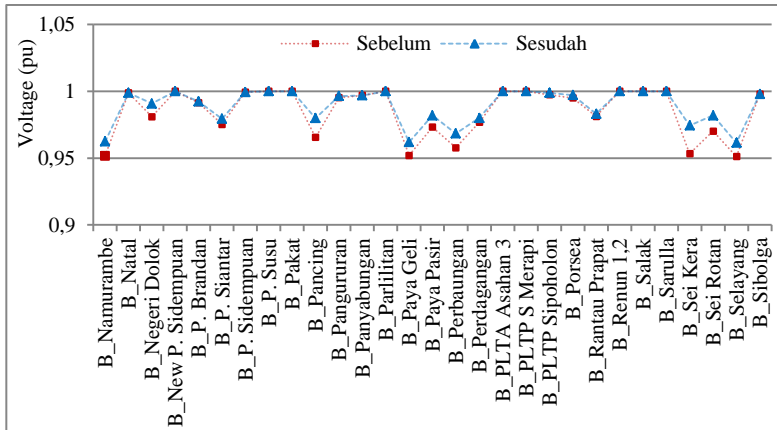
No	Bus	Injek VAR (MVar) Bus Sei Kera									
		V1 (pu)	Nominal	Actual	Nominal	Actual	Nominal	Actual	Nominal	Actual	
			125	116,9	150	141	175	165,3	200	189,9	
			V (pu)		V (pu)		V (pu)		V (pu)		
1	B_Sei Kera	0,95330	0,96720		0,96957		0,97196		0,97435		
2	B_Teladan	0,95050	0,96171		0,96353		0,96537		0,96721		
3	B_GIS Listrik	0,95255	0,96053		0,96165		0,96279		0,96392		
4	B_Titi Kuning	0,95353	0,96244		0,96380		0,96517		0,96654		
5	B_Batu Ginging	0,94924	0,95691		0,95800		0,95908		0,96017		
6	B_Namurambe	0,95177	0,95918		0,96025		0,96132		0,96239		
7	B_Helvetie	0,94726	0,95428		0,95527		0,95626		0,95725		
8	B_Selayang	0,95111	0,95832		0,95934		0,96037		0,96140		
9	B_Glugur	0,95017	0,95717		0,95816		0,95914		0,96013		
10	B_Paya Geli	0,95196	0,95895		0,95993		0,96091		0,96190		

Dari percobaan *incremental step* yang dilakukan sebagaimana ditampilkan pada tabel 4.6, diperoleh besar nilai daya reaktif yang harus diinjeksikan pada Bus Sei Kera yaitu sebesar 189,9 MVar. Dengan nilai injeksi sebesar 189,9 pada bus Sei Kera, tegangan bus sistem, khususnya untuk sepuluh bus kritis menjadi berada pada batas tegangan yang diijinkan baik pada saat beban normal maupun saat ada penambahan

beban dalam hal ini maksimal 10%, karena besar drop tegangan (ΔV) dari masing-masing bus mampu dijaga dari kondisi *undervoltage*.

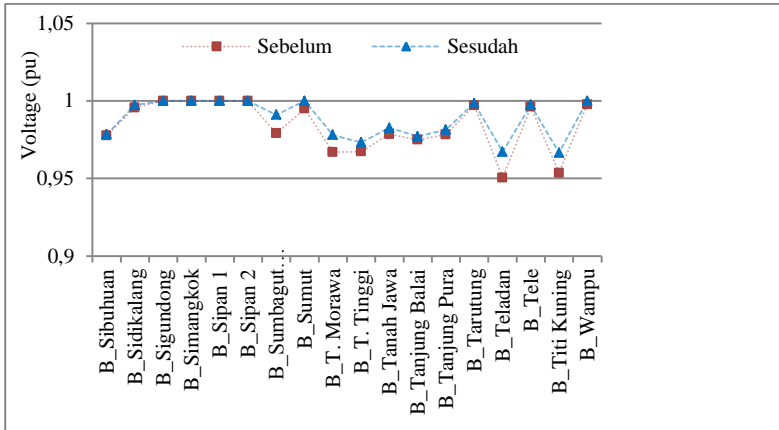


(a)



(b)

Gambar 4.6 Grafik profil tegangan bus sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor *shunt* (a) bus Aek Kanopan-bus Martabe, (b) bus Namurambe-bus Sibolga



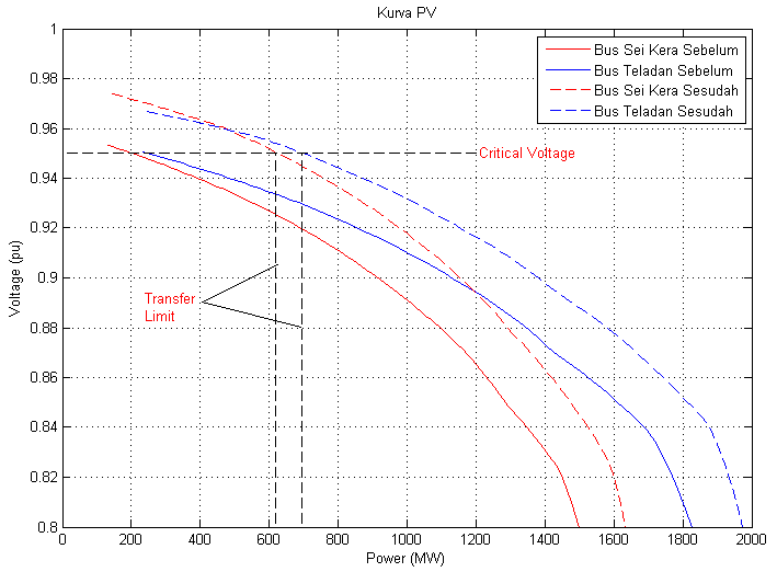
(c)

Gambar 4.6 Grafik profil tegangan bus sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor *shunt* (c) bus Sibuhuan-bus Wampu

Gambar 4.6 menunjukkan perubahan tegangan untuk semua bus dalam kondisi sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor pada bus Sei Kera. Terlihat bahwa semua kondisi tegangan bus berada pada batasan yang diijinkan yaitu $\pm 5\%$.

Selain berpengaruh pada peningkatan stabilitas tegangan, pemasangan kapasitor juga berpengaruh rugi-rugi saluran. Rugi-rugi saluran daya aktif yang semula sebesar 90,3 MW telah berkurang menjadi 88,9 MW. Ini artinya rugi-rugi saluran daya aktif pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV 2024 berkurang sebesar 1,55%.

Adapun perubahan kurva PV untuk kedua bus terlemah pada saat sebelum dan sesudah dipasang kapasitor dapat dilihat perubahannya pada gambar 4.7 dibawah.



Gambar 4.7 Kurva PV 2 bus terlemah sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor *shunt*

Dari gambar 4.7 kurva PV diatas dapat diketahui bahwa terlihat peningkatan daya yang mampu ditransfer pada bus bus Sei Kera dan Teladan dari kondisi sebelum dan setelah pemasangan kapasitor. Pada bus Sei Kera, daya yang mampu ditransfer sampai batas tegangan yang diijinkan adalah sebesar 619,69 MW dimana daya yang mampu ditransfer semula adalah 197,29 MW sedangkan pada bus Teladan adalah sebesar 694,22 MW dan daya yang mampu ditransfer semula adalah 234,22 MW. Seiring dengan meningkatnya karakteristik kurva PV pada kedua bus tersebut, maka secara langsung akan meningkatkan karakteristik kurva PV pada bus lainnya, khususnya pada 10 bus yang menjadi fokus perbaikan. Dengan meningkatkan karakteristik daya yang mampu ditransfer pada bus maka batasan stabilitas tegangan bus pun akan semakin meningkat.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada tugas akhir dengan judul “Identifikasi *Weak Bus* dan Peningkatan *Voltage Stability* pada Sistem Kelistrikan Sumatra Utara 150/275 kV Berdasarkan RUPTL Tahun 2024” dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Rasio perubahan tegangan terhadap perubahan total beban daya aktif (P) ketika ada penambahan beban secara proporsional sampai pembangkitan maksimum pada setiap bus menghasilkan indeks sensitivitas VP.
2. *Weak bus* yang diperoleh dari sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV adalah bus Sei Kera dengan indeks VP sensitivitas terkecil yaitu -0,00001800.
3. Hasil simulasi aliran daya pada sistem kelistrikan Sumut 150/275 kV 2024 pada saat beban puncak mendapatkan dua bus yang *undervoltage* yaitu bus Batu Gingging 0,94924 pu dan bus Helvetie 0,94726 pu. Setelah pemasangan kompensasi daya reaktif kapasitif pada *weak bus*, tegangan bus Batu Gingging dan bus Helvetie menjadi normal. Tegangan Batu Gingging menjadi 0,96017 pu dan bus Helvetie menjadi 0,95725 pu.
4. Khusus untuk dua bus terlemah, terlihat peningkatan batas stabilitas tegangan dan daya yang mampu ditransfer sampai kondisi tegangan kritis. Pada bus Sei Kera meningkat dari 197,29 MW menjadi 619,69 MW dan pada bus Teladan meningkat dari 234,22 MW menjadi 694,22 MW.
5. Pemasangan kapasitor pada bus lemah juga berpengaruh pada penurunan rugi-rugi transmisi Sumut 150/275 kV 2024 sebesar 1,55%. Rugi-rugi menurun dari 90,3 MW menjadi 88,9 MW.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk pengembangan pada tugas akhir ini adalah :

1. Adakalanya untuk kedepannya dalam menentukan kapasitas Var yang harus diinjeksikan pada bus lemah menggunakan metode perhitungan optimasi agar hasilnya menjadi semakin optimal.
2. Dalam menilai kestabilan tegangan sistem tenaga listrik adakalanya memperhatikan faktor-faktor lainnya seperti pengembangan sistem pada masa yang akan datang, pengaruh gangguan hubung singkat dan lain sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. _____, “*Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2016-2025*”. Kepmen ESDM, 2016.
- [2]. Marsudi, Djiteng., “*Operasi Sistem Tenaga Listrik*”. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [3]. Saadat, H., “*Power System Analysis*”, McGraw-Hill, Inc, 1999.
- [4]. Gonen, Turan., “*Modern Power System Analysis*”. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2013.
- [5]. Penangsang, Ontoseno., “*Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2*”, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [6]. Stevenson, W.D., Jr and John J. Grenger., “*Power System Analysis, 4th Edition*”. McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [7]. Kundur, P., “*Power System Stability and Control*”. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [8]. W. Taylor, Carson., “*Power System Voltage Stability*”. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [9]. Prayitno, Heru., “*Studi Perbaikan Stabilitas Tegangan Sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) dengan Pemasangan SVC Setelah Masuknya Pembangkit 1000 MW Paiton*”, Tugas Akhir Teknik Elektro-ITS, 2016.
- [10]. Agung Sembogo, Tutuk., “*Studi Perbaikan Stabilitas Tegangan Kurva P-V pada Sistem Jawa-Bali 500kV dengan Pemasangan Kapasitor Bank Menggunakan Teori Sensitivitas*”, Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [11]. Hwa Huang, Pei., “*Analysis For Effects Load Characteristics on Power System Voltage Stability*”, SciVirse ScienceDirect, AASRI Conference on Power and Energy Sytem, 2012.
- [12]. Parul Anand, U., “*Voltage Stability Assessment Using Continuation Power Flow*”, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2013.

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Penulis dengan nama lengkap **Wisnu Fajri**, lahir di Tasikmalaya, 16 Oktober 1994. Penulis memulai pendidikan formalnya di SD Negeri Padahayu sejak tahun 2000-2006, kemudian melanjutkan pendidikannya ke SMP Negeri 1 Bantarkalong pada tahun 2006-2009, kemudian melanjutkan pendidikannya ke SMA Negeri 1 Singaparna pada tahun 2009-2012. Setelah menyelesaikan pendidikan SMA, mulai

Agustus 2012 penulis melanjutkan pendidikan tinggi di jurusan D3 Teknik Elektro, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada dan menyelesaikan studinya pada Agustus 2015. Setelah menyelesaikan pendidikan jenjang D3, penulis melanjutkan studinya ke jenjang Sarjana di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

Email : wiznufazri@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 1
Data Kurva PV

Bus Sei Kera (Sebelum Pemasangan Kapasitor)					
No	P (MW)	V(pu)	No	P (MW)	V(pu)
1	131,29	0,9533	31	527,29	0,93167
2	144,49	0,9527	32	540,49	0,93081
3	157,69	0,95208	33	553,69	0,92995
4	170,89	0,95145	34	566,89	0,92907
5	184,09	0,95082	35	580,09	0,92818
6	197,29	0,95018	36	593,29	0,92726
7	210,49	0,94954	37	606,49	0,92632
8	223,69	0,94889	38	619,69	0,92536
9	236,89	0,94823	39	632,89	0,92439
10	250,09	0,94756	40	646,09	0,92341
11	263,29	0,94689	41	659,29	0,92241
12	276,49	0,94621	42	672,49	0,92141
13	289,69	0,94553	43	685,69	0,9204
14	302,89	0,94483	44	698,89	0,91936
15	316,09	0,94413	45	712,09	0,91831
16	329,29	0,94342	46	725,29	0,91725
17	342,49	0,9427	47	738,49	0,91618
18	355,69	0,94197	48	751,69	0,91509
19	368,89	0,94124	49	764,89	0,91399
20	382,09	0,9405	50	778,09	0,91286
21	395,29	0,93975	51	791,29	0,91169
22	408,49	0,93899	52	804,49	0,91051
23	421,69	0,93821	53	817,69	0,90932
24	434,89	0,93743	54	830,89	0,90811
25	448,09	0,93663	55	844,09	0,90689
26	461,29	0,93583	56	857,29	0,90565
27	474,49	0,93502	57	870,49	0,90439
28	487,69	0,93419	58	883,69	0,90312
29	500,89	0,93336	59	896,89	0,90183
30	514,09	0,93252	60	910,09	0,90053

Bus Sei Kera (Sebelum Pemasangan Kapasitor)					
No	P (MW)	V(pu)	No	P (MW)	V(pu)
61	923,29	0,8992	91	1319,29	0,84462
62	936,49	0,89785	92	1332,49	0,84251
63	949,69	0,89649	93	1345,69	0,84034
64	962,89	0,8951	94	1358,89	0,83813
65	976,09	0,8937	95	1372,09	0,83588
66	989,29	0,89228	96	1385,29	0,83357
67	1002,49	0,89084	97	1398,49	0,83121
68	1015,69	0,88938	98	1411,69	0,82878
69	1028,89	0,88791	99	1424,89	0,82628
70	1042,09	0,8864	100	1438,09	0,82371
71	1055,29	0,88483	101	1451,29	0,81965
72	1068,49	0,88324	102	1464,49	0,8149
73	1081,69	0,88164	103	1477,69	0,80987
74	1094,89	0,88001	104	1490,89	0,80415
75	1108,09	0,87836	105	1504,09	0,79763
76	1121,29	0,87668	106	1517,29	0,79047
77	1134,49	0,87497	107	1530,49	0,78247
78	1147,69	0,87314	108	1543,69	0,77327
79	1160,89	0,87126	109	1556,89	0,76221
80	1174,09	0,8693	110	1570,09	0,74642
81	1187,29	0,86728			
82	1200,49	0,86517			
83	1213,69	0,86296			
84	1226,89	0,8607			
85	1240,09	0,85838			
86	1253,29	0,856			
87	1266,49	0,85358			
88	1279,69	0,85111			
89	1292,89	0,84873			
90	1306,09	0,8467			

Bus Teladan (Sebelum Pemasangan Kapasitor)					
No	P (MW)	V(pu)	No	P (MW)	V(pu)
1	234,22	0,9505	28	841,72	0,92093
2	256,72	0,94963	29	864,22	0,91951
3	279,22	0,94874	30	886,72	0,91807
4	301,72	0,94783	31	909,22	0,91654
5	324,22	0,94692	32	931,72	0,91499
6	346,72	0,94599	33	954,22	0,91341
7	369,22	0,94505	34	976,72	0,9118
8	391,72	0,9441	35	999,22	0,91017
9	414,22	0,94313	36	1021,72	0,90851
10	436,72	0,94215	37	1044,22	0,90682
11	459,22	0,94116	38	1066,72	0,9051
12	481,72	0,94014	39	1089,22	0,90334
13	504,22	0,93912	40	1111,72	0,90155
14	526,72	0,93808	41	1134,22	0,89974
15	549,22	0,93701	42	1156,72	0,8979
16	571,72	0,93592	43	1179,22	0,89604
17	594,22	0,93481	44	1201,72	0,89409
18	616,72	0,93369	45	1224,22	0,89207
19	639,22	0,93255	46	1246,72	0,88998
20	661,72	0,93139	47	1269,22	0,88784
21	684,22	0,93018	48	1291,72	0,88566
22	706,72	0,92892	49	1314,22	0,88343
23	729,22	0,92764	50	1336,72	0,88103
24	751,72	0,92634	51	1359,22	0,87844
25	774,22	0,92502	52	1381,72	0,87564
26	796,72	0,92369	53	1404,22	0,87273
27	819,22	0,92233	54	1426,72	0,87027
55	1449,22	0,86801	66	1696,72	0,83896

Bus Teladan (Sebelum Pemasangan Kapasitor)					
No	P (MW)	V(pu)	No	P (MW)	V(pu)
56	1471,72	0,8657	67	1719,22	0,83463
57	1494,22	0,86333	68	1741,72	0,82886
58	1516,72	0,8609	69	1764,22	0,8227
59	1539,22	0,85841	70	1786,72	0,81529
60	1561,72	0,85585	71	1809,22	0,80716
61	1584,22	0,85323	72	1831,72	0,79809
62	1606,72	0,85054	73	1854,22	0,78775
63	1629,22	0,84778	74	1876,72	0,77548
64	1651,72	0,84494	75	1899,22	0,75778
65	1674,22	0,842			

Bus Sei Kera (Sesudah Pemasangan Kapasitor)					
No	P (MW)	V(pu)	No	P (MW)	V(pu)
1	131,29	0,97435	31	527,29	0,95642
2	144,49	0,97387	32	540,49	0,95558
3	157,69	0,97337	33	553,69	0,95474
4	170,89	0,97287	34	566,89	0,95389
5	184,09	0,97237	35	580,09	0,95303
6	197,29	0,97186	36	593,29	0,95216
7	210,49	0,97134	37	606,49	0,95124
8	223,69	0,97082	38	619,69	0,95031
9	236,89	0,9703	39	632,89	0,94938
10	250,09	0,96977	40	646,09	0,94843
11	263,29	0,96924	41	659,29	0,94748
12	276,49	0,96871	42	672,49	0,94652
13	289,69	0,96816	43	685,69	0,94552
14	302,89	0,96762	44	698,89	0,9445
15	316,09	0,96707	45	712,09	0,94349
16	329,29	0,9665	46	725,29	0,94246
17	342,49	0,96594	47	738,49	0,94142
18	355,69	0,96536	48	751,69	0,94037
19	368,89	0,96478	49	764,89	0,93931
20	382,09	0,96419	50	778,09	0,93823
21	395,29	0,9636	51	791,29	0,93715
22	408,49	0,963	52	804,49	0,93605
23	421,69	0,9624	53	817,69	0,93494
24	434,89	0,9618	54	830,89	0,93381
25	448,09	0,96118	55	844,09	0,93268
26	461,29	0,96046	56	857,29	0,93153
27	474,49	0,95967	57	870,49	0,93036
28	487,69	0,95887	58	883,69	0,92919
29	500,89	0,95806	59	896,89	0,928
30	514,09	0,95724	60	910,09	0,92675

Bus Sei Kera (Sesudah Pemasangan Kapasitor)					
No	P (MW)	V(pu)	No	P (MW)	V(pu)
61	923,29	0,92547	91	1319,29	0,87584
62	936,49	0,92416	92	1332,49	0,87395
63	949,69	0,92284	93	1345,69	0,87192
64	962,89	0,92151	94	1358,89	0,86988
65	976,09	0,92016	95	1372,09	0,86779
66	989,29	0,91879	96	1385,29	0,86567
67	1002,49	0,9174	97	1398,49	0,8635
68	1015,69	0,916	98	1411,69	0,86128
69	1028,89	0,91459	99	1424,89	0,85902
70	1042,09	0,91316	100	1438,09	0,8567
71	1055,29	0,91171	101	1451,29	0,85434
72	1068,49	0,91024	102	1464,49	0,85192
73	1081,69	0,90876	103	1477,69	0,84945
74	1094,89	0,90726	104	1490,89	0,84692
75	1108,09	0,90573	105	1504,09	0,84432
76	1121,29	0,90418	106	1517,29	0,84166
77	1134,49	0,9026	107	1530,49	0,83893
78	1147,69	0,90098	108	1543,69	0,83613
79	1160,89	0,89927	109	1556,89	0,83324
80	1174,09	0,89754	110	1570,09	0,83027
81	1187,29	0,89579			
82	1200,49	0,89397			
83	1213,69	0,8921			
84	1226,89	0,89017			
85	1240,09	0,88824			
86	1253,29	0,88624			
87	1266,49	0,88419			
88	1279,69	0,88201			
89	1292,89	0,87978			
90	1306,09	0,87767			

Bus Teladan (Sesudah Pemasangan Kapasitor)					
No	P (MW)	V(pu)	No	P (MW)	V(pu)
1	234,22	0,96721	28	841,72	0,94182
2	256,72	0,96655	29	864,22	0,94045
3	279,22	0,96588	30	886,72	0,93906
4	301,72	0,96519	31	909,22	0,93764
5	324,22	0,9645	32	931,72	0,93621
6	346,72	0,9638	33	954,22	0,93475
7	369,22	0,9631	34	976,72	0,93327
8	391,72	0,96238	35	999,22	0,93176
9	414,22	0,96166	36	1021,72	0,93024
10	436,72	0,96093	37	1044,22	0,92863
11	459,22	0,96017	38	1066,72	0,92695
12	481,72	0,95941	39	1089,22	0,92524
13	504,22	0,95864	40	1111,72	0,92351
14	526,72	0,95786	41	1134,22	0,92176
15	549,22	0,95707	42	1156,72	0,91998
16	571,72	0,95627	43	1179,22	0,91818
17	594,22	0,9552	44	1201,72	0,91636
18	616,72	0,95411	45	1224,22	0,9145
19	639,22	0,95301	46	1246,72	0,91258
20	661,72	0,95189	47	1269,22	0,91062
21	684,22	0,95073	48	1291,72	0,9086
22	706,72	0,94952	49	1314,22	0,90654
23	729,22	0,94829	50	1336,72	0,90445
24	751,72	0,94705	51	1359,22	0,90225
25	774,22	0,94578	52	1381,72	0,89987
26	796,72	0,9445	53	1404,22	0,89743
27	819,22	0,94317	54	1426,72	0,89508

Bus Teladan (Sesudah Pemasangan Kapasitor)					
No	P (MW)	V(pu)	No	P (MW)	V(pu)
55	1449,22	0,89303	66	1696,72	0,86616
56	1471,72	0,89091	67	1719,22	0,86327
57	1494,22	0,88875	68	1741,72	0,8603
58	1516,72	0,88654	69	1764,22	0,85724
59	1539,22	0,88428	70	1786,72	0,85409
60	1561,72	0,88197	71	1809,22	0,85085
61	1584,22	0,87953	72	1831,72	0,8475
62	1606,72	0,87699	73	1854,22	0,84404
63	1629,22	0,87439	74	1876,72	0,84037
64	1651,72	0,87172	75	1899,22	0,8332
65	1674,22	0,86898			

Data Rencana Pembangkit Sumut Sampai 2028

[illegible]

ID	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
PLTU Sumut-2								300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
PLTM Tersebar Sumut					46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
PLTP Sorik Marapi (FTP2)								80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
PLTU Sumut-2									300	300	300	300	300	300	300	300	300
PLTP Sorik Marapi (FTP2)									160	160	160	160	160	160	160	160	160
PLTA Batang Toru (Tapsel)										127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5
PLTA Batang Toru (Tapsel)										127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5
PLTA Batang Toru (Tapsel)										127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5
PLTA Batang Toru (Tapsel)										127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5	127.5
PLTA Simonggo-2										90	90	90	90	90	90	90	90
PLTP Sarulla II (FTP2)										110	110	110	110	110	110	110	110
PLTP Simbolon Samosir (FTP2)											55	55	55	55	55	55	55
PLTP Sipoholon Ria-Ria (FTP2)											55	55	55	55	55	55	55
PLTP Simbolon Samosir (FTP2)											55	55	55	55	55	55	55

Lampiran 3

Data Rencana Beban Sumut Sampai 2028

SUBSTATION	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
GI GLUGUR																	
- Peak Load (MW)	94,42	116,31	127,94	95,24	83,27	48,78	53,66	59,03	68,35	79,15	91,66	100,83	110,91	122,00	107,28	124,23	136,65
- Normal Load (MW)	99.97	123.15	135.47	100.84	88.17	51.65	56.82	62.50	72.37	83.81	97.05	106.76	117.43	129.18	113.59	131.54	144.69
GI GIS LISTRIK																	
- Peak Load (MW)	90,73	90,32	99,35	105,04	115,54	85,30	93,83	103,21	119,52	114,41	132,49	145,74	160,31	176,34	193,97	224,63	247,09
- Normal Load (MW)	96.07	95.64	70.13	74.15	81.56	60.21	66.23	72.86	84.37	80.76	70.14	77.15	84.87	74.69	82.15	79.28	87.21
GI. TITI KUNING																	
- Peak Load (MW)	99,85	119,84	131,82	140,76	136,30	132,85	146,13	84,25	97,56	112,97	130,83	143,91	158,30	174,13	191,54	221,81	243,99
- Normal Load (MW)	105.72	126.89	139.58	111.78	108.24	105.50	116.05	66.90	77.47	89.72	103.89	114.28	125.71	110.62	121.69	117.43	129.17
GI. PAYA PASIR																	
- Peak Load (MW)	45,18	39,75	43,73	32,10	35,31	38,84	42,72	46,99	54,42	63,02	72,98	80,28	88,30	97,13	106,85	123,73	136,11
- Normal Load (MW)	47.84	42.09	23.15	16.99	18.69	20.56	22.62	16.59	19.21	22.24	25.76	28.33	31.17	34.28	37.71	32.75	36.03
GI. MABAR																	
- Peak Load (MW)	48,39	24,33	26,76	29,44	32,38	35,62	39,18	43,10	49,91	57,80	66,93	73,63	80,99	89,09	98,00	113,48	124,83
- Normal Load (MW)	51.24	25.76	28.34	31.17	34.29	37.72	41.49	22.82	26.42	30.60	35.44	38.98	28.58	31.44	34.59	40.05	44.06
GI.KIM																	
- Peak Load (MW)	126,59	130,85	143,93	158,32	114,03	125,44	137,98	151,78	166,96	183,65	202,02	222,22	244,44	268,88	295,77	325,35	357,88
- Normal Load (MW)	134.04	138.54	152.40	167.64	120.74	99.61	109.57	120.53	106.07	116.67	106.95	117.64	110.92	122.01	117.44	114.83	126.31
GI LABUHAN																	
- Peak Load (MW)	18,80	20,51	22,56	24,82	27,30	30,03	33,03	36,33	42,08	48,73	56,42	62,07	68,27	75,10	86,97	100,71	110,78
- Normal Load (MW)	19.91	21.72	11.94	13.14	14.45	15.90	17.49	19.24	22.28	25.80	29.87	32.86	36.14	26.51	30.69	35.55	39.10
GI LAMHOTMA																	
- Peak Load (MW)	13,51	21,86	24,05	26,45	29,10	32,01	35,21	38,73	44,85	51,94	60,15	66,16	72,78	80,05	92,70	107,35	118,09
- Normal Load (MW)	14.30	9.26	6.37	7.00	7.70	8.47	9.32	10.25	11.87	13.75	9.10	10.01	11.01	12.11	14.02	16.24	14.71
GI DENAI																	
- Peak Load (MW)	45,74	60,10	66,11	64,22	66,94	73,63	80,99	59,09	68,43	79,24	91,77	100,94	111,04	122,14	134,36	155,59	171,14
- Normal Load (MW)	48.43	63.64	70.00	68.00	70.87	77.96	85.76	62.57	72.46	55.94	64.78	71.25	58.78	64.66	71.13	65.90	72.48

GI NAMURAMBE																	
- Peak Load (MW)	39,40	43,69	48,06	52,86	40,50	44,55	49,01	53,91	62,43	72,29	83,71	92,08	101,29	111,42	122,56	141,93	156,13
- Normal Load (MW)	41.72	46.26	50.89	55.97	42.88	47.17	51.89	57.08	66.10	76.54	59.09	65.00	71.50	78.65	64.89	75.14	82.65
GI SEI ROTAN																	
- Peak Load (MW)	52,07	72,68	79,95	87,94	66,93	58,62	64,48	70,93	82,14	95,12	110,15	121,16	133,28	146,61	161,27	186,75	205,43
- Normal Load (MW)	55.13	76.96	84.65	93.12	70.87	62.07	68.28	75.10	86.97	100.71	83.54	91.90	101.09	111.20	95.28	110.34	99.41
GI PAYA GELI																	
- Peak Load (MW)	96,50	113,07	124,38	124,06	116,49	120,78	132,86	146,14	160,76	176,83	194,52	213,97	235,36	258,90	284,79	329,79	362,77
- Normal Load (MW)	102.18	119.72	131.69	131.36	123.34	95.91	105.50	116.05	102.13	112.34	123.57	113.28	106.80	117.48	113.08	130.95	128.04
GI BINJAI																	
- Peak Load (MW)	72,94	84,13	90,02	66,32	70,96	53,18	56,90	60,89	67,62	75,10	83,41	89,25	95,49	102,18	109,33	121,42	129,92
- Normal Load (MW)	51.49	59.39	63.54	46.81	50.09	37.54	40.17	42.98	47.73	53.01	58.88	63.00	67.41	72.13	77.17	64.28	68.78
GI P.BRANDAN																	
- Peak Load (MW)	27,16	35,46	37,59	33,84	35,87	38,03	40,31	42,73	46,78	51,21	56,07	59,43	63,00	66,78	70,78	77,49	82,14
- Normal Load (MW)	28.76	37.55	39.80	35.83	25.32	26.84	21.34	22.62	24.76	27.11	29.68	31.46	33.35	35.35	37.47	41.03	28.99
GI PERBAUNGAN																	
- Peak Load (MW)	34,08	33,35	35,68	25,43	27,21	29,11	31,15	33,33	37,02	41,11	45,66	48,86	52,28	55,94	62,12	68,99	73,82
- Normal Load (MW)	36.08	35.31	37.78	26.92	28.81	30.83	32.98	35.29	39.20	43.53	48.35	51.73	55.35	59.23	65.78	73.05	46.90
GI T.MORAWA																	
- Peak Load (MW)	39,27	58,46	64,31	40,74	44,81	49,29	54,22	59,64	69,07	79,98	92,62	101,88	112,07	123,28	135,60	157,03	172,73
- Normal Load (MW)	41.58	61.90	68.09	43.13	31.63	34.79	38.27	42.10	48.75	56.46	65.38	71.92	59.33	65.26	71.79	66.51	73.16
GI TEBING TINGGI																	
- Peak Load (MW)	43,75	56,90	61,45	66,37	71,68	47,41	51,20	55,30	62,29	70,17	79,04	85,36	92,19	99,56	107,53	121,12	130,81
- Normal Load (MW)	46.32	60.25	65.07	70.27	75.89	50.20	54.22	58.55	65.96	74.29	55.79	60.25	65.07	70.28	75.90	85.50	69.25
GI KUALA TANJUNG																	
- Peak Load (MW)	39,25	42,51	44,64	31,55	33,13	34,78	36,52	38,35	41,38	44,65	48,18	50,59	53,11	55,77	58,56	63,19	66,34
- Normal Load (MW)	41.56	45.01	47.26	33.41	35.08	36.83	38.67	40.61	43.81	47.28	51.01	53.56	56.24	59.05	62.00	66.90	70.25
GI PEMATANG SIANTR																	
- Peak Load (MW)	53,93	51,90	57,09	41,92	46,11	50,72	55,79	61,37	71,07	82,30	95,31	104,84	83,85	92,24	101,46	117,49	129,24
- Normal Load (MW)	57.10	54.95	60.45	44.38	48.82	53.71	59.08	64.98	75.25	87.14	100.91	79.29	63.42	69.76	76.73	88.86	97.75
GI GUNUNG PARA																	
- Peak Load (MW)	9,02	12,74	13,19	13,65	14,13	14,62	15,13	15,66	16,53	17,44	18,41	19,05	19,72	20,41	21,12	22,29	23,07

- Normal Load (MW)	9.55	13.49	13.96	7.23	7.48	7.74	8.01	8.29	8.75	9.23	9.74	10.09	10.44	10.80	11.18	11.80	12.21
GI KISARAN																	
- Peak Load (MW)	72.52	69.12	73.96	79.14	33.69	36.04	38.57	41.27	45.83	50.90	56.53	60.49	64.72	69.25	76.91	85.42	91.40
- Normal Load (MW)	76.79	73.19	62.80	67.20	28.60	30.61	32.75	35.04	38.92	43.22	48.00	51.36	54.96	58.81	65.31	72.54	77.61
GI AEK KANOPAN																	
- Peak Load (MW)	18.47	17.58	18.81	14.53	15.54	16.63	17.79	19.04	21.15	23.49	26.08	27.91	29.86	31.95	34.19	37.97	40.63
- Normal Load (MW)	19.56	18.61	7.73	5.97	6.39	6.84	7.32	7.83	8.70	9.66	10.73	11.48	12.28	13.14	6.49	7.21	7.72
GI RANTAU PRAPAT																	
- Peak Load (MW)	44.97	54.57	58.39	54.48	58.29	62.37	66.74	71.41	79.31	88.08	97.82	104.67	112.00	119.84	128.23	142.41	152.38
- Normal Load (MW)	47.62	57.78	47.14	43.98	47.06	50.36	53.88	38.43	42.69	47.41	52.65	56.34	60.28	48.38	51.76	57.49	61.51
GI KOTA PINANG																	
- Peak Load (MW)	23.28	24.91	26.65	28.52	30.52	32.65	34.94	37.38	41.52	46.11	51.21	54.80	58.63	62.73	67.13	74.55	79.77
- Normal Load (MW)	24.65	26.37	14.11	15.10	16.16	17.29	18.50	19.79	10.99	12.21	13.56	14.50	15.52	16.61	17.77	19.73	21.12
GI BRASTAGI																	
- Peak Load (MW)	30.83	40.30	41.91	43.59	40.92	42.55	44.25	46.02	48.93	52.03	55.31	57.53	59.83	62.22	64.71	68.80	71.55
- Normal Load (MW)	32.64	42.67	44.38	46.16	43.32	45.05	46.86	48.73	51.81	55.09	58.57	60.91	63.35	39.53	41.11	43.71	45.46
GI SIDIKALANG																	
- Peak Load (MW)	13.60	16.39	16.96	17.56	13.53	14.00	14.49	15.00	15.83	16.71	17.63	18.25	18.89	19.55	20.23	21.35	22.10
- Normal Load (MW)	14.40	17.35	17.96	18.59	14.33	14.83	15.35	15.88	16.76	17.69	18.67	19.32	20.00	20.70	21.42	22.61	23.40
GI TELE																	
- Peak Load (MW)	9.43	8.34	6.59	0.79	0.81	0.83	0.86	0.88	0.93	0.97	1.02	1.05	1.08	1.11	1.16	1.22	1.26
- Normal Load (MW)	9.98	8.83	6.98	0.83	0.86	0.88	0.91	0.94	0.98	1.03	1.08	1.11	1.14	1.18	1.23	1.29	1.33
GI PORSEA																	
- Peak Load (MW)	18.37	10.16	10.46	10.78	11.10	11.43	11.78	12.13	12.70	13.31	13.94	14.36	14.79	15.23	15.95	16.71	17.21
- Normal Load (MW)	19.45	7.17	7.39	7.61	7.84	8.07	8.31	8.56	8.97	9.39	9.84	10.13	10.44	10.75	11.26	11.79	12.15
GI TARUTUNG																	
- Peak Load (MW)	12.10	33.79	34.80	35.85	36.92	38.03	39.17	40.35	42.26	44.26	46.36	47.75	49.18	50.66	53.06	55.58	57.24
- Normal Load (MW)	12.81	35.78	36.85	37.96	39.10	40.27	41.48	42.72	44.75	46.87	49.09	50.56	28.04	28.88	30.25	31.69	32.64
GI SIBOLGA																	
- Peak Load (MW)	23.30	23.78	24.97	26.22	27.53	28.90	30.35	31.87	34.39	37.10	40.03	42.04	44.14	46.34	48.66	52.51	55.13
- Normal Load (MW)	24.67	25.18	26.44	27.76	29.15	30.61	32.14	33.74	36.41	39.28	42.39	44.51	46.73	49.07	51.52	55.59	35.92
GI P.SIDEMPUAN																	

- Peak Load (MW)	43,40	52,79	55,96	41,21	43,69	46,31	49,09	52,03	55,15	58,46	61,97	65,69	69,63	73,81	78,24	82,93	87,91
- Normal Load (MW)	45.95	55.90	59.25	43.64	46.26	49.03	51.98	55.09	58.40	61.90	65.62	69.55	73.73	78.15	82.84	87.78	92.31
GI GUNUNG TUA																	
- Peak Load (MW)	9,80	15,38	16,00	8,99	9,34	9,72	10,11	10,51	11,18	11,88	12,63	13,14	13,66	14,21	15,11	16,06	16,71
- Normal Load (MW)	10.38	16.28	16.94	9.51	9.89	10.29	10.70	11.13	11.83	12.58	13.38	13.91	14.47	15.05	16.00	17.01	17.69
GI LABUHAN ANGIN																	
- Peak Load (MW)	5,32	5,53	5,75	2,98	3,10	3,23	3,36	3,49	3,71	3,95	4,20	4,36	4,54	4,72	5,02	5,34	5,55
- Normal Load (MW)	5.63	5.86	6.09	3.16	3.29	3.42	3.55	3.70	3.93	4.18	4.44	4.62	4.81	5.00	5.31	5.65	5.88
GI KUALA NAMU																	
- Peak Load (MW)		32,30	35,53	39,08	42,99	47,29	52,02	57,22	66,26	76,73	88,86	97,75	107,52	118,27	136,96	158,60	174,46
- Normal Load (MW)		34.20	37.62	20.69	22.76	25.04	27.54	30.29	35.08	40.62	37.63	41.40	37.95	41.74	36.25	41.98	36.95
GI DOLOK SANGGUL																	
- Peak Load (MW)			2,00	1,77	1,87	1,99	2,10	2,23	2,44	2,67	2,93	3,10	3,29	3,49	5,70	6,24	6,61
- Normal Load (MW)			2.12	1.87	1.98	2.10	2.23	2.36	2.59	2.83	3.10	3.29	3.48	3.69	6.03	6.60	7.00
GI PARLILITAN																	
- Peak Load (MW)				0,35	0,36	0,38	0,39	0,40	0,41	0,43	0,44	0,45	0,47	0,48	2,50	2,58	2,66
- Normal Load (MW)				0.37	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46	0.48	0.49	0.51	2.64	2.73	2.81
GI SALAK																	
- Peak Load (MW)					1,73	1,78	1,84	1,90	1,96	2,02	2,09	2,15	2,22	2,29	4,36	4,50	4,64
- Normal Load (MW)					1.83	1.89	1.95	2.01	2.07	2.14	2.21	2.28	2.35	2.42	4.62	4.76	4.91
GI NEGERI DOLOK																	
- Peak Load (MW)				3,50	3,57	3,64	3,71	3,79	3,91	4,03	4,16	4,24	4,33	4,41	5,50	5,68	5,79
- Normal Load (MW)				3.71	3.78	3.86	3.93	4.01	4.14	4.27	4.40	4.49	4.58	4.67	5.83	6.01	6.13
GI TANJUNG PURA																	
- Peak Load (MW)				37,44	38,94	40,50	42,11	43,80	46,57	49,51	52,64	54,75	56,94	59,21	67,96	72,25	75,14
- Normal Load (MW)				39.64	20.61	21.44	22.30	23.19	24.65	26.21	27.87	28.98	30.14	31.35	35.98	38.25	39.78
GI PANGURURAN																	
- Peak Load (MW)				6,00	6,24	6,49	6,75	7,02	7,46	7,93	8,44	8,77	9,12	9,49	14,87	15,81	16,44
- Normal Load (MW)				6.35	6.61	6.87	7.15	7.43	7.90	8.40	8.93	9.29	9.66	10.05	15.74	16.74	17.41
GI LABUHAN BILIK																	
- Peak Load (MW)				14,14	14,71	15,30	15,91	16,55	17,59	18,70	19,89	20,68	21,51	22,37	28,78	30,60	31,83
- Normal Load (MW)				14.98	15.58	16.20	16.85	17.52	18.63	19.80	21.06	21.90	22.77	23.69	30.48	32.40	33.70

GI KIM 2																	
- Peak Load (MW)					51,00	56,10	61,71	67,88	78,61	91,03	105,41	115,95	127,55	140,30	154,34	178,72	196,60
- Normal Load (MW)					54.00	59.40	65.34	71.87	83.23	96.38	111.61	122.78	90.04	99.04	108.94	126.16	138.77
GI SELAYANG																	
- Peak Load (MW)					61,77	67,95	74,75	82,22	95,21	110,26	127,68	140,45	154,49	169,94	186,94	216,48	238,13
- Normal Load (MW)					65.41	71.95	79.14	87.06	100.81	116.74	90.13	99.14	109.06	95.97	105.57	101.87	112.06
GI PANCING																	
- Peak Load (MW)					70,54	77,59	85,35	93,89	108,73	125,91	145,80	160,38	176,42	194,06	247,47	286,57	315,23
- Normal Load (MW)					74.69	82.16	90.37	99.41	115.12	88.87	102.92	90.57	99.63	91.32	99.82	101.14	111.26
GI BATU GINGGING																	
- Peak Load (MW)						119,96	131,96	145,16	159,67	175,64	193,20	212,52	233,78	257,15	282,87	327,57	360,32
- Normal Load (MW)						84.68	93.15	102.46	84.53	92.99	102.28	94.75	104.22	99.01	108.91	110.99	109.01
GI PERDAGANGAN																	
- Peak Load (MW)				79,81	84,60	89,68	95,06	100,76	110,32	120,78	132,23	140,16	148,57	157,49	172,42	188,76	200,09
- Normal Load (MW)				84.51	89.58	63.30	67.10	71.13	77.87	63.94	70.00	74.20	78.66	66.70	73.02	79.95	84.74
GI GALANG																	
- Peak Load (MW)				9,25	9,71	10,20	10,71	11,24	12,13	13,09	14,12	14,83	15,57	16,35	22,64	24,43	25,65
- Normal Load (MW)				9.79	10.28	10.80	11.34	11.90	12.85	13.86	14.96	15.70	16.49	17.31	7.99	8.62	9.05
GI TANJUNG BALAI																	
- Peak Load (MW)					50,99	54,05	57,29	60,73	66,49	72,79	79,69	84,48	89,54	94,92	100,61	110,15	116,76
- Normal Load (MW)					53.99	57.23	60.66	64.30	70.40	77.07	84.38	59.63	63.21	67.00	71.02	77.75	82.42
GI PAKKAT																	
- Peak Load (MW)				3,76	3,84	3,92	4,00	4,08	4,20	4,34	4,47	4,56	4,65	4,75	4,90	5,05	5,15
- Normal Load (MW)				3.99	4.07	4.15	4.23	4.31	4.45	4.59	4.74	4.83	4.93	5.03	5.19	5.35	5.46
GI TANAH JAWA																	
- Peak Load (MW)													32,94	35,25	37,71	41,89	44,82
- Normal Load (MW)													34.88	37.32	39.93	44.35	47.45
GI DAIRI																	
- Peak Load (MW)					7,36	7,51	7,66	7,81	8,06	8,31	8,58	8,75	8,92	9,10	9,39	9,69	9,88
- Normal Load (MW)					7.79	7.95	8.11	8.27	8.53	8.80	9.08	9.26	9.45	9.64	9.94	10.25	10.46
GI SIBUHUAN																	
- Peak Load (MW)				12,75	13,39	14,06	14,76	15,50	16,72	18,04	19,47	20,44	21,46	22,54	23,66	25,53	26,81

- Normal Load (MW)				13.50	14.18	14.88	15.63	16.41	17.71	19.10	20.61	21.64	22.73	23.86	25.06	27.04	28.39
GI SEI KERA																	
- Peak Load (MW)				35,50	39,05	42,96	47,25	51,98	60,19	93,70	108,51	119,36	131,29	144,42	158,86	183,97	202,36
- Normal Load (MW)				37.59	41.35	45.48	50.03	55.03	63.73	99.21	114.89	84.25	92.68	101.94	112.14	97.39	107.13
GI HELVETIA																	
- Peak Load (MW)				55,75	61,88	68,69	76,25	84,63	99,34	116,61	136,88	151,94	168,65	187,20	207,79	243,91	270,74
- Normal Load (MW)				59.03	65.52	72.73	80.73	89.61	105.19	82.31	96.62	107.25	89.29	99.11	88.01	103.30	95.56
GI PENYABUNGAN																	
- Peak Load (MW)				13,00	13,82	9,70	10,31	10,96	11,65	12,39	13,17	14,00	14,89	15,83	21,83	23,21	24,68
- Normal Load (MW)				13.76	14.63	10.27	10.91	11.60	12.34	13.12	13.95	14.83	15.77	16.76	23.12	24.58	26.13
GI RAYA																	
- Peak Load (MW)																	
- Normal Load (MW)																	
GI MARTABE																	
- Peak Load (MW)			4,42	4,60	4,78	4,97	5,17	5,38	5,72	6,08	6,46	6,72	6,99	7,27	9,73	10,34	10,76
- Normal Load (MW)			4.68	4.87	5.06	5.26	5.47	5.69	6.05	6.44	1.71	1.78	1.85	1.92	2.58	2.74	2.85
GI NATAL																	
- Peak Load (MW)						5,00	5,20	5,41	5,75	6,11	6,50	6,76	7,03	7,31	9,60	10,21	10,62
- Normal Load (MW)						5.29	5.51	5.73	6.09	6.47	1.72	1.79	1.86	1.94	2.54	2.70	2.81
GI KUALA																	
- Peak Load (MW)						22,75	23,89	25,08	27,06	29,20	31,51	33,08	34,74	36,48	40,30	43,48	45,66
- Normal Load (MW)						24.09	25.29	26.56	28.66	30.92	33.36	35.03	36.78	38.62	42.67	46.04	48.34
GI TELADAN																	
- Peak Load (MW)						15,00	16,50	124,65	144,35	167,16	193,57	212,93	234,22	257,64	287,41	332,82	366,10
- Normal Load (MW)		-	-	-	-	15.88	17.47	87.99	101.89	88.49	102.48	112.73	99.20	109.12	101.44	117.47	110.75